

研究助成
成果報告論文集
(平成28年度)

公益財団法人 カシオ科学振興財団
CASIO SCIENCE PROMOTION FOUNDATION

成果報告論文

第32回(平成26年度) 研究助成

No	研 究 テ ー マ	代 表 研 究 者
1	全周から見ることのできるホログラム表示技術の実現	東京農工大学大学院工学研究院 教授 高 木 康 博
2	有機円偏光発光デバイスの創出と革新的三次元表示技術への展開	九州大学稲盛フロンティア研究センター 教授 安 田 琢 麿
3	非線形スピントロニクス機能による次世代省エネルギー電子技術基盤の構築	慶應義塾大学理工学部 准教授 安 藤 和 也
4	透光性多結晶セラミックを用いた次世代レーザー加工用冷却型光アイソレータの開発	北見工業大学工学部 助教 古 瀬 裕 章
5	一次元電子系物質を基盤とした多孔性物質の創製と分子吸脱着による物性変換	東北大学大学院理学研究科 助教 井 口 弘 章
6	フォトニック・メタ表面による機能性近赤外光学フィルターの研究	東北大学大学院工学研究科 准教授 大 寺 康 夫
7	世界最小の5軸制御磁気浮上モータを用いた小児用人工心臓の研究開発	茨城大学工学部 助教 長 真 啓
8	透過・反射同時測定テラヘルツ時間領域分光装置開発とそれを用いたラマン不活性ソフトモードの研究	筑波大学数理物質系 助教 森 龍 也
9	量子サイズ効果を利用して有機デバイスの電荷注入準位をチューニングする新手法の確立	東京理科大学理工学部 講師 中 山 泰 生
10	室温無磁場において非散逸伝導を示す界面材料の開拓	東京大学大学院工学系研究科 助教 打 田 正 輝
11	空気中で駆動可能な拮抗筋アクチュエータの創出	東京大学生産技術研究所 助教 森 本 雄 矢
12	動的自己活性化分子性電磁ナノコイルの開発	東京農工大学大学院工学研究院 講師 帯 刀 陽 子
13	今後のICT技術の成長に不可欠な、広帯域・低消費電力無線通信用デルタシグマA/D変換LSIの新設計法	山梨大学工学部 助教 兼 本 大 輔
14	分子配向技術の導入による非線形光学ナノ光デバイスの高性能化	静岡大学工学部 准教授 杉 田 篤 史
15	コランダム構造酸化物を用いた高移動度トランジスタ(HEMT)の開発	京都大学大学院工学研究科 助教 金 子 健 太 郎
16	光反応誘起相分離法による銀ナノワイヤーを用いた透明導電性フィルム創成	京都工芸繊維大学高分子機能工学部門 助教 中 西 英 行
17	発話タイミングの齟齬を修復する音声対話システムに関する研究	大阪大学産業科学研究所 教授 駒 谷 和 範
18	共ドーピングシリコンナノ結晶を単電子島として用いた単電子素子の研究	神戸大学大学院工学研究科 助教 加 納 伸 也
19	色覚特性者の色彩感覚モデルに基づく自然な画像補正アルゴリズムの提案	香川大学工学部知能機械システム工学科 助教 佐 藤 敬 子
20	フルスペクトル太陽電池用革新的透明導電膜の創製	佐賀大学大学院工学系研究科 教授 田 中 徹

No	研 究 テ ー マ	代 表 研 究 者
21	ブラックホール直接撮像のための気球VLBI搭載高速データ記録装置の開発	総合研究大学院大学物理科学研究科 助教 土 居 明 広
22	浮体式洋上風車の動揺抑制を実現する高性能制御	大阪府立大学大学院工学研究科 准教授 原 尚 之
23	強誘電体ドメイン壁の特異性を利用したナノデバイスの創出	兵庫県立大学工学部 助教 中 嶋 誠 二
24	インパルスプラズマ・テラヘルツ過渡吸収分光法によるグラフェンの超高速ダイナミクスの解明	立命館大学理工学部 助教 寺 本 高 啓
25	単孔式内視鏡下手術支援ローカル操作型フレキシブル術具マニピュレータ	大阪工業大学工学部 准教授 河 合 俊 和
26	歯槽骨再生誘導療法のための骨膜伸展型エミュレーションデバイスの開発	東北大学大学院歯学研究科 講師 山 内 健 介
27	新規心臓ペースメーカー作成を目指した心臓の生理学的解析	京都大学大学院医学研究科 特任講師 山 本 正 道
28	楕形電極の誘電泳動を利用する間葉系幹細胞スフェロイドの作製および力学的刺激に基づく分化制御	東京大学大学院総合文化研究科 准教授 吉 本 敬 太 郎
29	全人工膝関節置換術のリスク回避に寄与する高分解能圧力センサ内蔵インサートの開発	福井大学大学院工学研究科 准教授 長 宗 高 樹
30	ブレインマシンインタフェースによる肢体不自由者の運動機能再建と健康増進を支援するシステムの開発と適用	大阪大学大学院医学系研究科 助教 柳 澤 琢 史
31	感情的プロソディを変更する気分誘導方法を用いた認知症の行動・心理症状を緩和するシステムの研究開発	佐賀大学大学院工学系研究科 准教授 中 山 功 一
32	放散近赤外光を用いた高精細リアルタイム脳機能計測技術の開発	広島市立大学大学院情報科学研究科 教授 樋 脇 治
33	無細胞マイクロ血管モデルの開発	東洋大学理工学部 講師 佐々木 直 樹
34	高度専門職学芸員養成プログラムの開発に関する研究 ——大学博物館の効果的な活用方法の検討	東京大学総合研究博物館 特任助教 寺 田 鮎 美
35	小中学校理科教育支援のための中核的教員養成・支援に関する実証的研究	福井大学教育地域科学部 教授 浅 原 雅 浩
36	脳内情報処理における「運動—言語連関」の理解:効果的な運動学習支援に向けて	首都大学東京人間健康科学研究科 教授 樋 口 貴 広
37	原発避難者支援の多様性確保に向けた仕組み構築に関する比較研究	法政大学人間環境学部 教授 西 城 戸 誠

【1】 全周から見ることができるホログラム表示技術の実現

研究代表者 東京農工大学大学院工学研究院 教授 高木 康博
共同研究者 東京農工大学大学院工学研究院 准教授 田中 洋介
共同研究者 東京農工大学大学院工学研究院 助教 柏木 謙

〔研究の概要〕

360° 全周から見ることができ、画面サイズの拡大が可能で、テーブル型の表示面に立体表示できるホログラムディスプレイを実現した。これは、MEMS 空間光変調器(SLM)、拡大結像系、および回転スクリーンで構成される。MEMS SLM は高フレームレートでホログラムパターンを表示し、拡大結像系は画面サイズを拡大し、回転スクリーンは縮小された視域を回転走査することで全周表示を実現する。この際、縮小された視域を瞳孔径よりも大きくすることで、実質的な波面再生を実現する。実験システムを作製し、提案法の有効性を実証した。MEMS SLM としては、フレームレート 22,727 Hz の Digital micromirror device を用いた。回転スクリーンの回転にはサーボモータを用い、回転スクリーンの直径は 100 mm (画面サイズ) とし、一周で 800 個の縮小した視域を発生した。フレームレート 28.4 Hz で、全周立体表示が実現できることを確認した。

〔研究経過および成果〕

ホログラフィーは、光の波面を再生する理想的な立体表示方式であり、その電子的な実現を目指して、世界各国で研究が進められている。しかし、その実現の難易度は極めて高く、ブレークスルー技術が求められている。

電子的なホログラフィー実現の難しさは、視域(立体像を観察できる範囲)の大きさが表示デバイスの画素ピッチに反比例し、画面サイズが表示デバイスの解像度(画素数)に比例することにある。そのため、最先端のスーパーハイビジョン用の表示デバイス(画素ピッチ 5 μm 、解像度 7,680×4,320)を用いても、6° の視域角(視域の大きさを画面からの角度で表したもの)と 1.7 インチの画面サイズしか実現できない(波長 0.5 μm の場合)。このように、実用的な視域と画面サ

イズが得られないことが最大の課題である。

本研究では、電子的なホログラフィー実現のために、従来とは全く逆のアプローチを用いる。すなわち、高フレームレートな MEMS 空間光変調器(SLM)を用いて、その表示面を光学的に拡大し、画面サイズを拡大する。この場合、画素ピッチが拡大する。そのため、視域は縮小するが、縮小した視域を空間走査することで視域を拡大する。さらに、空間走査に回転スクリーンを用いることで、全周表示とテーブル型表示面を実現する。

本研究で提案するホログラム表示システムの構成を、図1に示す。MEMS SLM の表示面を拡大結像系により、画面である回転スクリーン上に拡大結像する。回転スクリーンは、光軸が回転軸と一致しない偏心レンズになっていて、回転軸外に光を集光する。この集光

位置に、縮小された視域が形成される。スクリーンが回転すると、視域も回転軸の周りを回転するために、視域の回転走査が実現できる。

提案法の有効性を検証するために、表示システムを試作した。写真を図2に示す。今回は作製の容易さから、反射型の回転スクリーンを用いて、光学系をスクリーン上方に配置した。MEMS SLM としては、Digital Micromirror Device を用いた。フレームレート 22,727 Hz、画素ピッチ 13.68 μm 、解像度 1,024 $\times$ 768である。拡大光学系の倍率は5.71倍とし、画面サイズを直径 100 mm に拡大した。回転スクリーンには、大型なレンズが必要なため、フレネルレンズを用いた。フレネルレンズにアルミ蒸着を行い反射型スクリーンとし、レンチキュラレンズと組み合わせて垂直方向に光を拡散して垂直方向の観察範囲を拡大した。スクリーンの回転にはサーボモータを用い、回転数を 1,704 rpm として、フレームレート 28.4 Hz のホログラム表示を実現した。この際、800 個の縮小された視域が円周上に回転走査される。縮小された視域の幅は 5.81 mm で、人間の眼の平均瞳孔径 5 mm より大きいため、実質的な波面再生が実現できる。

表示できた全周ホログラム映像を図3に示す。スクリーンのまわりの4方向から撮影した。見る方向によって、3次元物体の相対的な位置関係が変化して見え、正しく全周立体表示が実現できていることがわかる。また、スクリーンから離れた位置でも、ぼけの小さなシャープな立体像が観察できた。

試作した表示システムに対して、視域形成、解像度、輝度、フリッカについて評価した。詳細については、発表論文にまとめている。

今後は、カラー化とマルチチャンネル化によるさらなる大画面化を行う予定でいる。

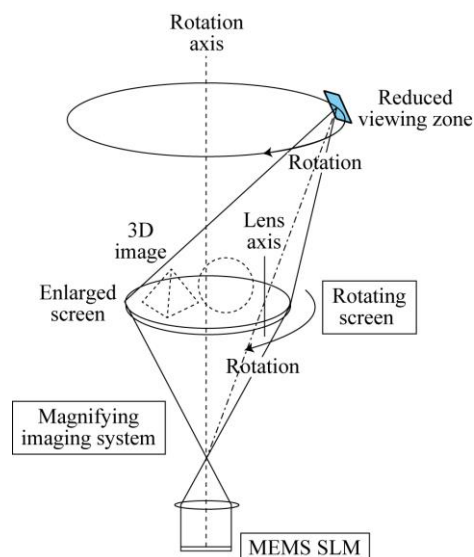


図1 提案する表示システム

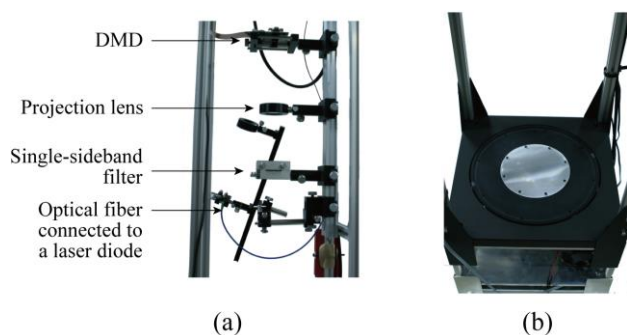


図2 試作した表示システム：
(a) プロジェクタ部、(b) 回転スクリーン部

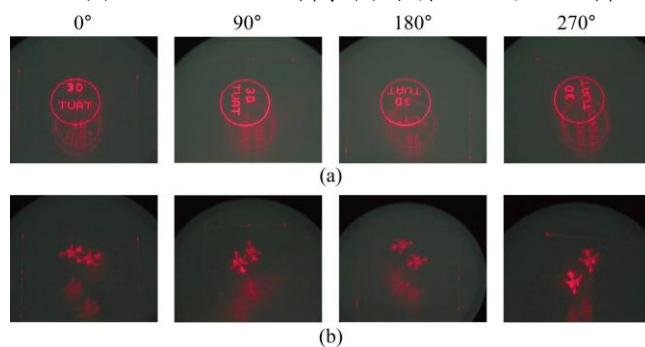


図3 表示した全周ホログラム映像：
(a) symbols, (b) two planes

最後に、本研究を助成して頂いたカシオ科学振興財団に心より感謝する。

〔発表論文〕

1. T. Inoue and Y. Takaki, "Table screen 360-degree holographic display using circular viewing-zone scanning," Opt. Express, vol. 23, no. 5, 6533-6542 (2015).

【2】 有機円偏光発光デバイスの創出と革新的三次元表示技術への展開

研究者 九州大学 稲盛フロンティア研究センター 教授 安田 琢磨

〔研究の概要〕

発光効率の向上を目指して、様々な有機蛍光材料や燐光材料がこれまでに開発されてきた。有機 EL (OLED) における電流励起下でのキャリア再結合による励起子生成過程では、スピン統計則に基づいて一重項 (S_1) 励起子が 25%、三重項 (T_1) 励起子が 75% の確率で生成される。近年、高効率 OLED を実現のための新たな手法として、イリジウム等の貴金属を使用せずに T_1 を発光に寄与させる方法として、 T_1 状態を S_1 状態にアップコンバージョンさせる熱活性化遅延蛍光 (TADF) が提案され、注目を集めている。本研究では、高効率なフルカラー TADF 発光材料の開発を目指して、分子設計・合成、光学物性・デバイス評価に関する研究を行った。さらに、本知見を活用し、軸不斉を有する新規円偏光発光材料の開発を行った。

〔研究経過および成果〕

まず初めに、分子不斉を持たないドナー・アクセプター型分子系においてエネルギーレベルの精密制御に基づく、フルカラー発光の実現を目指した(図1)。設計・合成した5種類の発光材料を6 wt%でホスト中にドーピングした共蒸着薄膜を作製し、光学物性の評価を行った。図2に示すように、ドナー・アクセプター強度の変化に伴って系統的に E_g が変化することにより、発光極大は 450~610 nm まで

シフトし、青色～赤色の可視域全域に渡る TADF 発光を得ることに成功した。これらのドーピング膜の発光量子収率は、赤色を除くと 63~86% の高い値を示した。さらに、発光の過渡特性を評価した結果、5種類全ての発光材料において ns オーダーの速い発光成分(蛍光)と μ s オーダーの遅い発光成分(遅延蛍光)が観測され、明確な TADF 特性を示すことが明らかとなった。

次に、これらの発光材料を用いた OLED を作製

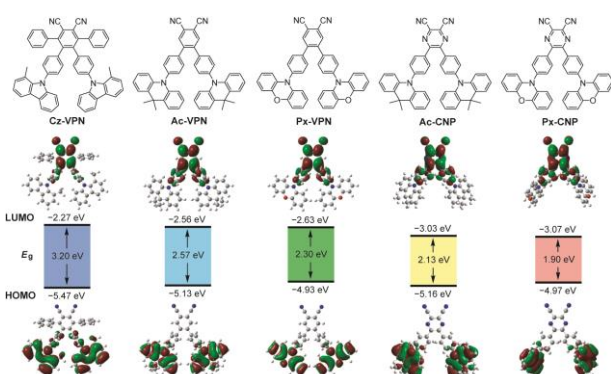


図1 フルカラー発光材料の分子設計とフロンティア軌道 (B3LYP/6-31G(d,p))

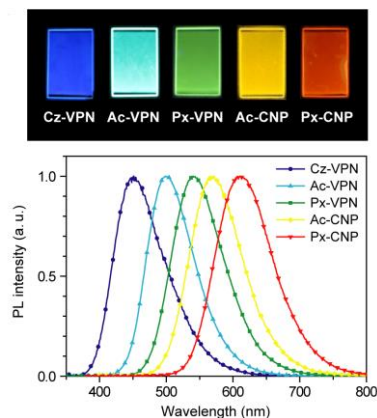


図2 フルカラー発光材料の PL スペクトル

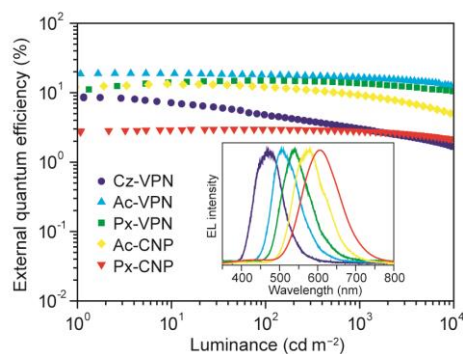


図3 フルカラー発光材料を用いた OLED の外部 EL 量子効率－輝度特性

し、デバイス特性を評価した(図3)。素子構造は、ITO/ α -NPD (40 nm)/mCP (10 nm)/emitter:host (20 nm)/PPF (10 nm)/TPBi (30 nm)/LiF (0.8 nm)/Al (100 nm)を用いた。全てのデバイスにおいて、通常の蛍光 OLED を凌ぐ高い外部 EL 量子効率 (η_{ext}) が得られた。特にスカイブルー素子においては、 η_{ext} は最大で約 19%を示した。このように、TADF を利用して T_1 励起子を効率的に S_1 状態へアップコンバージョンさせる手法により、高効率フルカラー TADF-OLED が実現できた。

次いで、これらの知見・結果を踏まえ、軸不斉を分子骨格に導入した新規円偏光発光材料の開発を行った。図4に示すように、キラル固定相を用いたクロマトグラフィーにより、光学異性体（エナンチオマー）の分割に成功した。今後は、これらの新規材料を用いたデバイス作製・評価を進め、

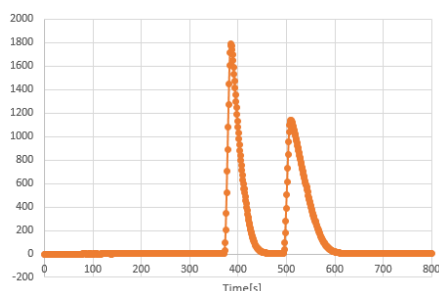


図4 軸不斉を有する新規有機発光材料のクロマトグラフィーによる光学分割

高効率な円偏光発光デバイスの開発へ繋げていく。

[発表論文]

1. High Efficiency Pure Blue Thermally Activated Delayed Fluorescence Molecules Having 10H-Phenoxaborin and Acridan Units, M. Numata, T. Yasuda, C. Adachi, *Chem. Commun.*, 51, 9443 (2015).
2. Organic Light-Emitting Diodes Based on Donor-substituted Phthalimide and Maleimide Fluorophores, M. E. Jang, T. Yasuda, J. Lee, S. Y. Lee, C. Adachi, *Chem. Lett.*, 44, 1248 (2015).
3. A Phenazaborin-Based High-Efficiency Blue Delayed Fluorescence Material, I. S. Park, M. Numata, C. Adachi, T. Yasuda, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, in press (2016).
4. Full-Color Delayed Fluorescence Materials Based on Wedge-Shaped Phthalonitriles and Dicyanopyrazines: Systematic Design, Tunable Photophysical Properties, and OLED Performance, I. S. Park, S. Y. Lee, C. Adachi, T. Yasuda, *Adv. Funct. Mater.*, in press (2016).
5. Thermally Activated Delayed Fluorescence Polymers for Efficient Solution-Processed Organic Light-Emitting Diodes, S. Y. Lee, T. Yasuda, H. Komiyama, J. Lee, C. Adachi, *under revision* (2016).
6. High-Efficiency Blue Organic Light-Emitting Diodes Based on Thermally Activated Delayed Fluorescence from Phenoxaphosphine and Phenoxathiin Derivatives, S. Y. Lee, C. Adachi, T. Yasuda, *submitted* (2016).

【3】 非線形スピントロニクス機能による次世代省エネルギー電子技術基盤の構築

研究者 慶應義塾大学理工学部 准教授 安藤 和也

〔研究の概要〕

本研究は、マグノン系の非線形効果を利用することで、金属系スピントロニクス素子では実現困難な非線形スピントロニクス機能創出を目指した。マグノン分裂・散乱をターゲットとしてスピン流の増幅効果を系統的に測定することで、金属/絶縁体界面におけるスピン流生成現象がマイクロ波周波数・強度・温度に強く依存することが見出された。本現象はマグノンエネルギー分散の形状変化によりマグノン散乱が現われ、これによるスピン系のダンピング変化によって発現したものであることが明らかとなった。

〔研究経過および成果〕

スピン系の素励起「マグノン」をベースとした研究はマグノニクスと呼ばれ、伝導電子スピン流を基盤とするスピントロニクスとは独立して研究が進められてきた。しかし近年、金属/絶縁体界面において伝導電子スピン流とマグノン間の角運動量移行が存在することが明らかとなり、それまで独立に進められてきたスピントロニクスとマグノニクスが一つに交差した。本研究は、マグノン系が顕著に示す非線形効果を利用することで、金属系スピントロニクス素子では実現困難な非線形スピントロニクス機能を創出し、次世代省エネルギー素子の物理基盤構築を目指した。

本研究ではマグノン分裂をターゲットとし、スピン流の非線形増幅効果を系統的に測定した。スピン系の素励起であるマグノンは、非線形効果により分裂・散乱を生じる。マグノンの分裂にはエネルギー及び運動量が保存する必要がある、この過程はマグノンの励起周波数により制御できる。このようなマグノン分裂によるスピン流増大現象を逆スピンホール効果により検出した結果を図 1 に示す。この結果は、Pt/Y₃Fe₅O₁₂ 接合において、固定周波数のマイクロ波を照射しな

がら Pt 層に生じる逆スピンホール電圧 V とマイクロ波吸収強度 P_{abs} を同時に測定したものである。3.4GHz 以下のマイクロ波励起周波数ではマグノン分裂が許され、スピン流の増大現象が観測されている。このようなマグノン相互作用によるスピン流増大現象を詳細に調べるため、さらに温度を変えて絶縁体から流れ出すスピン流を測定したのが図 2 である。図 2 は、異なるマイクロ波励起周波数において測定した Pt/Y₃Fe₅O₁₂ 接合におけるスピン流の温度依存性であり、同一の試料でありながら、マグノンの励起周波数に依存して、全く異なる振る舞いを示している。すなわち、金属/絶縁体界面という非常にシンプルな構造でありながら、この系におけるスピン流生成はマイクロ波周波数・強度・温度に依存し、多様な振る舞い

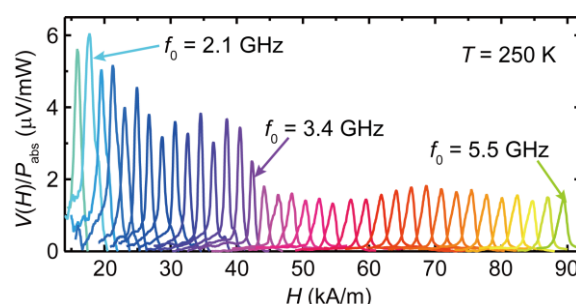


図 1：マグノン分裂によるスピン流増大現象

を示す。これが本研究により明らかとなったマグノンの非線形相互作用による効果である。

このような振る舞いは、マグノンの分裂・散乱によって理解できる。4.0 GHz のマイクロ波励起周波数では、マグノンの分裂に必要なエネルギー分散の条件は室温では満たされていない。しかし、温度を下げることで $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ の飽和磁化が増大し、これを通じてマグノンのエネルギー分散の形状が変化する。これによりマグノン分裂条件が低温で満たされたことで、スピンの増大が観測されたのが図 2 の結果である。さらに、このようなスピン流増大現象の本質は相互作用によるマグノン数の変化ではなく、スピン系のダンピングの変化である。すなわち、マグノン相互作用の役割は、マイクロ波からスピン系へと移行した角運動量を、マグノンの消滅・生成により長寿命のマグノンへ集中的に受け渡すことによって定常状態における非平衡マグノン数を増大させることにあり、これがスピン流増大現象へと繋がる。したがって、散乱前後のマグノン数を変えるマグノン分裂のみならず、2 つの一樣モードマグノンが有限波数をもつ 2 つのマグノンへと散乱される 4 マグノン散乱によってもスピン流増大現象は発現する。このような 4 マグノン散乱は、低温で顕著に生じ、かつマイクロ波励起強度に強く依存する。7.6 GHz のマイクロ波励起周波数では 50 K においてもマグノン分裂は許されないが、その代わりに 4 マグノン散乱が顕著になることで、絶縁体からスピン流へと流れ出すスピン流量がマイクロ波励起強度に依存した振る舞いを示したと解釈できる。

このように、スピン流の増大現象はマグノンの散乱プロセスに依らず金属/絶縁体界面において一般的に現れる現象である。これまでの膨大な研究により体系的な理解が得られている非線形スピンダイナミクスに

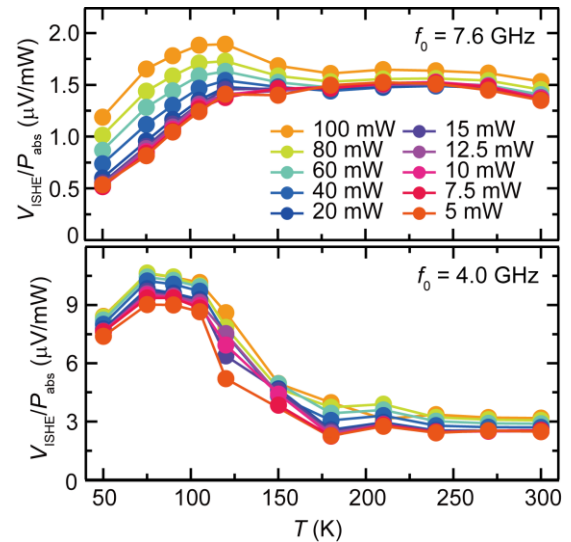


図 2：マグノン分裂・散乱によるスピン流増大の観測

関する知見を背景とし、マグノンと伝導電子スピン間のスピンキャリア変換によって可能となったスピントロニクスとマグノニクスの融合により、今後更なる研究の進展が期待される。

〔発表論文〕

1. Akiyo Nomura, Takaharu Tashiro, Hiroyasu Nakayama, and Kazuya Ando, "Temperature dependence of inverse Rashba-Edelstein effect at metallic interface," Applied Physics Letters 106, 212403 (2015).
2. Satoshi Haku, Takaharu Tashiro, Hiroyasu Nakayama, Jun'ichi Ieda, Shiro Entani, Seiji Sakai, and Kazuya Ando, "Spin pumping blocked by single-layer graphene," Applied Physics Express 8, 073009 (2015).
3. Takaharu Tashiro, Saki Matsuura, Akiyo Nomura, Shun Watanabe, Keehoon Kang, Henning Sirringhaus, and Kazuya Ando, "Spin-current emission governed by nonlinear spin dynamics," Scientific Reports 5, 15158 (2015).

【4】透光性多結晶セラミックを用いた次世代レーザー加工用冷却型光アイソレータの開発

研究者 北見工業大学 工学部 助教 古瀬 裕章

〔研究の概要〕

本研究は、キロワット級の超短パルスレーザーのような、次世代レーザーにも適用可能な光アイソレータの開発を目的としている。磁気光学材料には近年 100 mm 角の大口径化が可能となり、単結晶と同程度の光学特性、熱特性、磁気特性を有するテルビウム・ガリウム・ガーネット(TGG)多結晶セラミックを世界に先駆けて採用した。主に、TGG 多結晶体の熱膨張係数、熱光学係数(dn/dT)の高温特性を実験から求め、得られた結果を基にキロワット級の高出力レーザー導入時に生じる熱レンズ効果、熱複屈折効果を計算から見積もった。冷却機構無しの場合、室温では約 4%の熱複屈折損失が生じる可能性があることがわかった。

〔研究経過および成果〕

産業用キロワット級超短パルスレーザーを対象とした光アイソレータを実現するためには、①高平均出力動作に耐え得る高い熱特性を有する、②ダメージ損傷を避けるため大口径化が可能、③高いヴェルデ定数 V を有し、適度な磁場強度で所望の偏光回転角が得られる、等の条件を満たす磁気光学材料が必要である。従来、TGG 単結晶が多用されてきたが、単結晶材料では主に上述の②に制限が与えられていた。近年大口径化が可能な透光性 TGG 多結晶体が国内メーカー等によって製作可能となり、キロワット級超短パルスへの導入を検討した。

TGG 多結晶体の熱光学効果

本研究では、TGG 多結晶体の熱膨張係数 α と熱光学係数 dn/dT をはじめに評価した。測定にはフィゾー干渉法を利用した。 α と dn/dT を同時測定するために、H 字型の試料を準備した。試料をヒーター付きの台座に固定した後、真空チャンバー内に設置した。プローブ光には He-Ne レーザー ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) を用い、ビーム拡大・平行光とした後に試料に照射し

た。試料の反射光から、試料中心部および真空部による2種類の干渉縞を形成した。ヒーター加熱によって試料の温度を変化させると熱膨張および屈折率変化によって光路長差が生じ干渉縞が変化する。各干渉縞シフト量を光検出器で計測し、 α および dn/dT の値を算出した。室温から 500 K まで温度を変調させ、5 K 毎の値を評価した。

熱膨張率 α および熱光学係数 dn/dT の測定結果を図 1 に示す。TGG 多結晶体の α 、 dn/dT は温度にしたがって増加した。室温における α および dn/dT の値はそれぞれ 7.0×10^{-6} 、 $17.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ であったが、500 K ではそれぞれ 8.6×10^{-6} 、 $22.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ に増加した。このことから、高出力レーザー導入時の波面歪や複屈折損失量は温度上昇に伴って顕著に現れると考えられ、冷却等の対策を講じなければビーム品質の劣化の原因となると考えられる。一方、TGG 単結晶に対しても同様の測定を行った。その結果、単結晶と多結晶セラミックでは結果の値に大きな差が生じなかった。

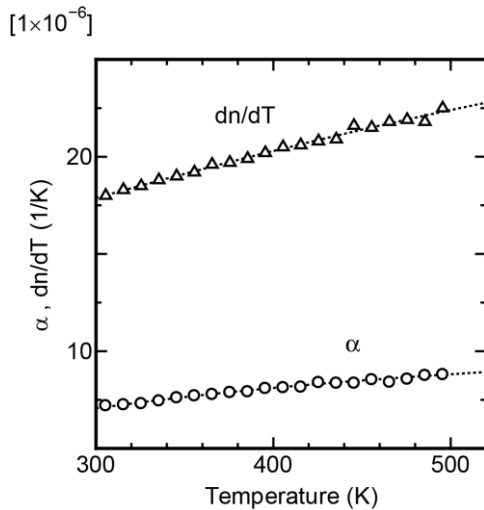


図 1: TGG 多結晶体の熱膨張および熱光学係数の測定結果.

1 キロワットレーザー導入時の熱解析

TGG 多結晶体による光アイソレータに対して、1 キロワットレーザーを導入した場合、どの程度の熱問題（熱複屈折損失量、熱レンズ効果）が生じるかを計算から見積もった。計算では、図 1 の実験結果を使用した。また光アイソレータに使用される結晶長を 20 mm とし、吸収係数には報告されている値 ($a_0 = 2.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$) を用いた。

図 2 に熱複屈折損失量と TGG 結晶温度の関係を示す。計算では、室温で 4% 程度の複屈折損失量が生じると見積もることができ、温度が高くなるにしたがってより顕著になることがわかる。光アイソレータとして使用する場合には、複屈折損失量を低減する必要がある。このためには、冷却機構の導入や、結晶分割によって温度上昇を抑制するための対策が必要と考えられる。

図 3 に熱レンズ焦点距離と結晶径の関係を示す。結果から、熱レンズ効果は、結晶温度よりも、結晶径に強く依存すると考えられる。単結晶と比較して多結晶体では 5 倍程度結晶径の大きな試料を合成できる

ため、多結晶体を用いることで熱レンズ焦点距離は劇的に改善できると期待できる。

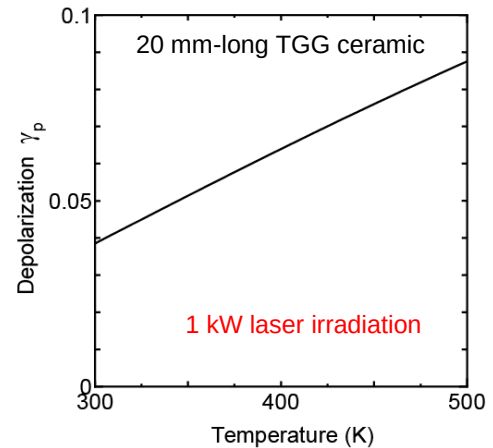


図 2: 熱複屈折損失量と温度の関係.

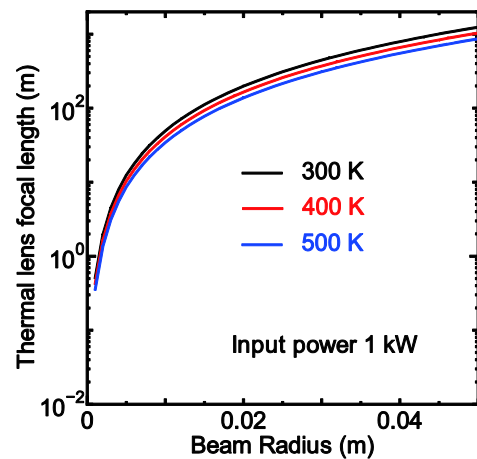


図 3: 熱レンズ焦点距離と結晶径の関係.

本報告内容の詳細は、文献[1]に記載されている。

[発表論文]

1. H. Furuse, R. Yasuhara, and K. Hiraga, “Thermo-optic effects of ceramic TGG in the 300–500 K temperature range,” *Optical Materials Express*, 5 (6), 1266–1273 (2015).
2. 梅津佳祐, 古瀬裕章, 安原亮, 平賀啓二郎, “テルビウム-ガリウム-ガーネット(TGG)多結晶体の高温熱光学効果,” 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 14p-PA2-2

【5】一次元電子系物質を基盤とした多孔性物質の創製と分子吸脱着による物性変換

研究者 東北大学大学院理学研究科 助教 井口 弘章

〔研究の概要〕

本研究では、結晶性を維持したまま分子の吸脱着が可能な多孔性配位高分子 (MOF) と、優れた電子物性を有する一次元電子系物質を組み合わせることで、両者の長を併せ持ち、弱点を補い合った、新しい高機能多孔性物質の創製を行い、ナノ細孔内の分子吸脱着によってその電子物性を変換することを目的とした。具体的には、(1)MOF 中で π 共役有機分子を積層させることによる一次元電子系の構築、(2)伝導性一次元鎖錯体を主骨格とした MOF の構築、という2つのアプローチで研究を進めた。(1)では、ナフタレンジイミド (NDI) という電子受容性の高い有機分子の一次元積層構造を有する MOF の合成に成功し、ヒドラジンとの反応や電気化学的な還元にも成功した。(2)では MOF の構築の前に中間化合物を用いた一次元鎖錯体の合成を試したところ、予想外なことに、極めて稀な平均原子価状態が得られ、高い電気伝導性を示すことが明らかとなった。

〔研究経過および成果〕

アプローチ1:MOF 中で π 共役有機分子を積層させることによる一次元電子系の構築

本アプローチでは、ピリジル基などの配位可能部位を導入した NDI 誘導体を合成し、直管中での溶液拡散法により、種々の金属イオンとゆっくり反応させることで、MOF 結晶の合成を行った。配位部位として 2-pyridylethyl 基を導入した NDI 誘導体 (NDI-Etpy) と Cu^{2+} との組み合わせでは、図 1 に示した結晶構造を有する MOF $[\text{Cu}(\text{NDI-Etpy})_2(\text{NO}_3)_2] \cdot 2\text{CHCl}_3$ (**1**) が得られた。**1**は 2 つの Cu^{2+} イオン間が 2 つの NDI-Etpy 分子によって架橋された四角形ユニット (図 1a) が一次元鎖状に配列しており、四角形ユニット内及びユニット間に π - π スタッキングが存在して一次元積層構造を形成している。四角形ユニット内に存在するクロロホルム分子は強く保持されており、150 $^{\circ}\text{C}$ 以上という高温でようやく脱離することが明らかとなった。脱離後の構造解析にはまだ成功していない

が、クロロホルムの抜けた後にはナノ細孔ができると考えられる。そこで、還元力を有するヒドラジン分子の

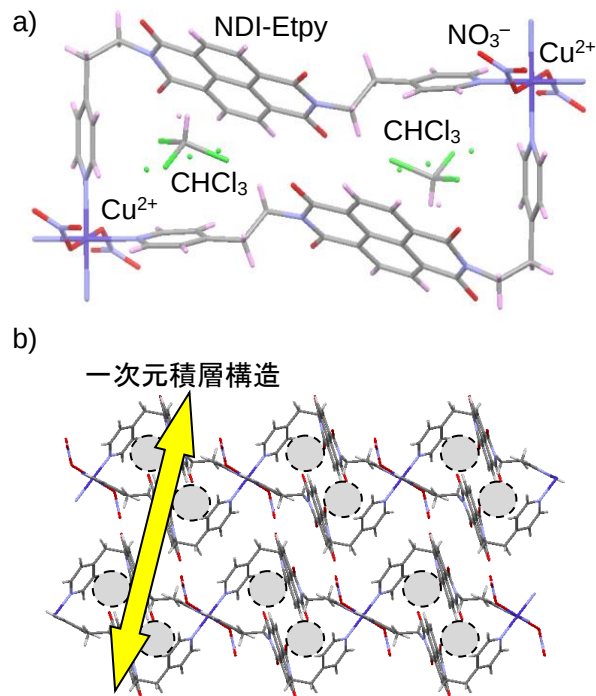


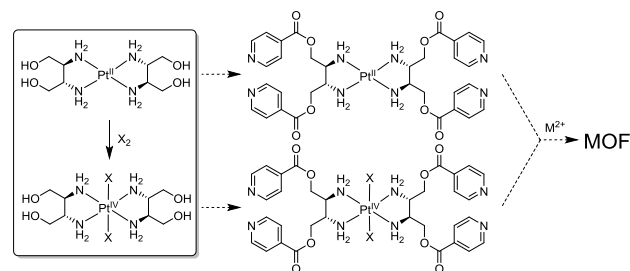
図 1 $[\text{Cu}(\text{NDI-Etpy})_2(\text{NO}_3)_2] \cdot 2\text{CHCl}_3$ (**1**) の結晶構造. a) 四角形ユニット拡大図. b) パッキング構造: 矢印は一次元積層構造を、点線枠内はナノ細孔を示す.

溶液やガスに暴露したところ、MOF 結晶の色が青紫色から黒色へと変化した。現在、詳細な分析を行っているところであるが、過去の研究から NDI ラジカルが黒色を呈することが明らかとなっており、**1** もナノ細孔中にヒドラジン分子が取り込まれ、NDI 積層カラムに電子がドーピングされたと考えられる。今後は、単結晶を用いた電気伝導度測定などを行い、ヒドラジンとの反応により、絶縁体から伝導体に転移していることなどを明らかにしていく予定である。

また、上記のような中性の NDI 誘導体を後から還元するという手法のほかに、溶液中で電気化学的に還元を行いながら MOF を合成するという手法にも取り組んでおり、最近ようやく NDI の π 共役平面が一次元状に積層し、なおかつ部分還元状態となって高い伝導性が期待される MOF を合成することに成功した。現状では空気酸化による劣化が避けられず、室温での電気伝導率も 10^{-4} Scm^{-1} オーダーではあるが、今後、NDI 分子にシアノ基等の電子吸引性の置換基を導入することで、空気中でも安定な高伝導性 MOF の合成が可能であると確信している。

アプローチ2: 伝導性一次元鎖錯体を主骨格とした MOF の構築

本アプローチでは、導電性一次元金属錯体として知られている MX 錯体に着目し、安価なキラル試薬である L-酒石酸を原料として、まず前駆体となる Scheme 1 の左枠内に示した Pt(II)及び Pt(IV)錯体を合成した。同様の反応により Pd(II)錯体も得た。配位部位であるピリジル基を導入する前に、これらの前駆体のみを用いて MX 錯体の合成・構造解析を行ったところ、Pd 錯体を臭素で酸化した場合には、図2に示した構造の MX 錯体 **2** が得られた。MX 錯体では平



Scheme 1 配位部位を有する Pt 錯体の合成と MOF への展開

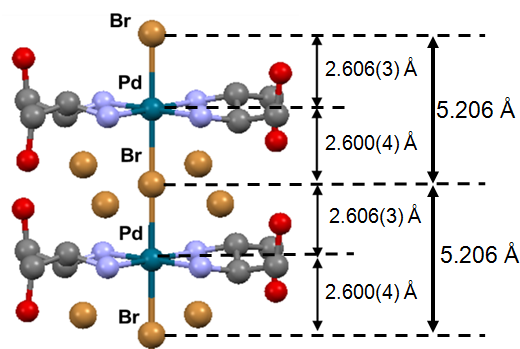


図2 MX 錯体 **2** の一次元鎖構造

均原子価 (AV) 相 (金属イオンが全て 3 価) と混合原子価 (MV) 相 (2 価と 4 価の金属イオンが交互に配列) という 2 種類の電子状態があり、AV 相では世界最高の三次非線形光学感受率や高い伝導性などの魅力的な機能の発現が期待される。過去の研究から、Pd、Pt 錯体では AV 相は例外的であり、Pd 錯体では Pd-Br-Pd 間距離が 5.26 Å を下回ると AV 相となることが知られていたが、驚くべきことに、**2** の Pd-Br-Pd 間距離は 5.206 Å と極めて短く、種々の測定から、Pd 錯体では極めて稀な AV 相にあることが確かめられた。**2** の室温での電気伝導率は 0.36 Scm^{-1} と MX 錯体では過去最高であった。同様の実験を Pt 錯体でも行っており、Pt 系では初の AV 相の実現も期待される。

今後は、**2** が AV 相となる原因を解明するのと平行して、ピリジル基の導入と MOF 合成を行い、分子吸脱着による電子状態や物性の変換に取り組む。

なお、これまで得られた結果については、今年中に著名な国際学術誌にて発表する予定である。

【6】 フォトニック・メタ表面による機能性近赤外光学フィルターの研究

研究者 東北大学工学研究科 准教授 大寺 康夫

〔研究の概要〕

本研究は近赤外スペクトルイメージングに応用するための多並列近赤外分光フィルターを、ガラス基板上的の高屈折膜に形成したサブ波長幾何学格子(フォトニック・メタ表面)を利用することで実現することを目的に行われた。着目したメタ表面は反転対称性を持たない卍形状の単位格子(キラル格子)からなり、波長選択性の光学活性を示す。研究期間中に、Siからなるキラル格子層と石英基板の間に Si_3N_4 等の中間層を挿入するのが有効であること、各層を水平伝搬する電磁界モードが光学活性に関与していること、キラル層／一様層境界での左右円偏光の反射率・透過率差が光学活性の源泉とみられること、中間屈折率材料ごとに波長選択性能の上限が存在することなど、理論上重要な知見を多数見出した。また本学微細加工実験施設で膜形成の実験も行った。

〔研究経過および成果〕

本研究の開始時点では、石英基板上的の Si 単層膜にその厚みの中ほどまでキラルパターンをドライエッチ加工することで、近赤外波長フィルターとして利用可能なフォトニック・メタ表面(Photonic Meta-Surface: 以後 PMSと略記)を実現できることがわかっていった。またこの膜構造にて、基板上的の位置ごとにキラル格子の配置間隔(格子ピッチ)を変化させることで、透過特性の異なるフィルターを共通の基板の上に並列集積できること(図 1)も明らかになっていた。しかし実際の作製プロセスを考慮すると、意図した深さで正確にエッチングを停止させることは難しく、エッチストップ層の役割を兼ねた中間屈折率層を Si のキラル層と下地の

石英基板の間に挿入することが現実的に好ましいのではないかと考えた。そこで比較的容易に低損失な膜を形成できる種々の誘電体について、挿入の効果を数値シミュレーションを通して検討した。その結果、 Si_3N_4 が好適であることを見出した。この材料系で、格子ピッチをさまざまに変えた際の波長フィルターとしての透過特性の試算結果を図 2 に示す。近赤外分

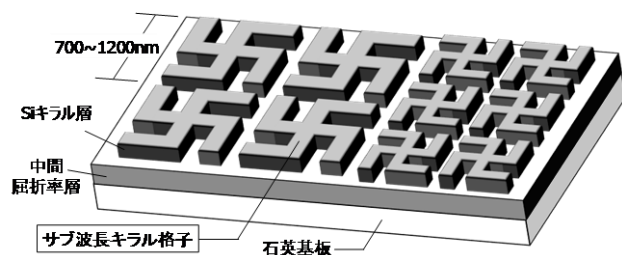


図 1. フォトニック・メタ表面の概念図.

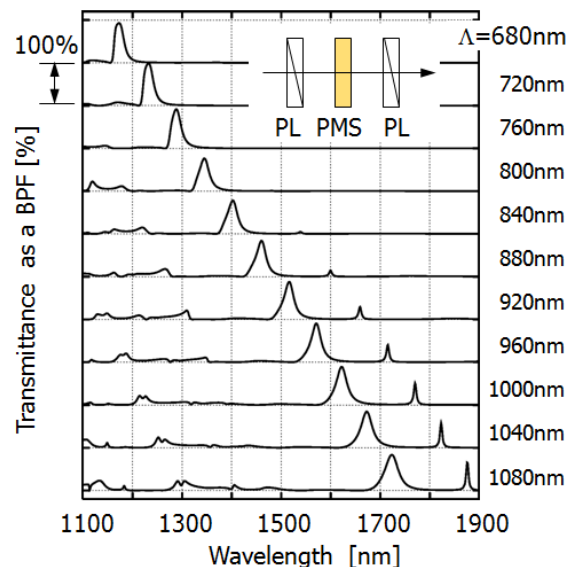


図 2. 中間屈折率層に Si_3N_4 を用いた PMS 型波長フィルターの透過特性. Λ は格子ピッチ. キラル層, 中間層の厚みはそれぞれ 500nm, 550nm. (PMS: Photonic Meta-Surface, PL: Polarizer.)

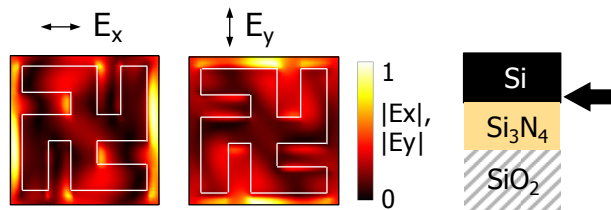


図 3. 光学活性波長で直線偏光(図の E_x)を入射した際に形成される電磁界分布(キラル層底部). 同程度の振幅で y 偏光成分も生じているのがわかる.

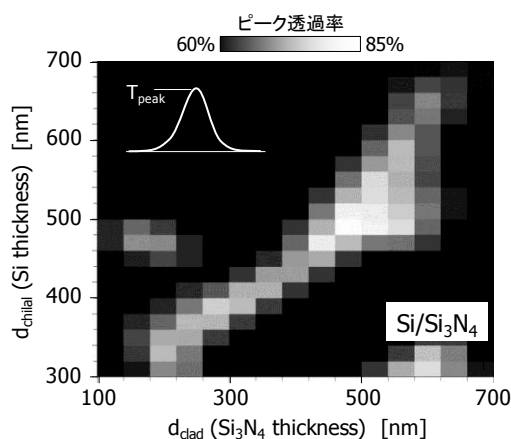


図 4. 面内ピッチ 780nm の構造における, キラル層 (Si, 縦軸) と中間層 (Si₃N₄, 横軸) の厚みに対する BPF のピーク透過率の分布. 高透過率に必要な層厚みの関係が明瞭に確認できる.

光に必要な波長 1200~1700nm の波長域で、帯域幅 20~30nm の単峰性透過ピークが得られている。Si₃N₄ は続くキラル層用の Si 膜と同じくプラズマ CVD プロセスによる一貫成膜が可能であり、期間後半には本学附属の微細加工実験施設で成膜実験も行った。その結果、Si₃N₄ について当該波長域で屈折率約 1.825 の膜を再現性よく形成できることを確認した。

このように使用する膜材料と構造定数については最適値が判明したが、光学活性の発生メカニズムは未だ不明瞭であった。そこで構造・材料設計に理論的基盤を与えるべく、PMS で光学活性が発現している波長において内部に形成されている電磁界を数値シミュレーションで詳細に検討した。結果の一部を図 3 に示す。PMS の通過に伴い、入射した直線偏光成分は消滅し、他方の直線偏光成分のみが発生する。こ

の結果によれば Si キラル層通過の段階ではほぼ変換率は 1/2 程度で、残りは一様で偏波変換機能を持たないはずの Si₃N₄ 層が担っていることを明らかにした。また Si 層, Si₃N₄ 層中を水平伝搬する電磁界モードの分散関係を制御することで、狙った波長で偏光回転を生じさせることも明らかにした。研究期間の最後には中間屈折率材料ごとの性能限界も明らかにし、これにより応用に応じた膜材料の選定基準が確立された。以上、主として理論面で、PMS の分光素子実現に向けた基盤を確立でき、また基礎的な膜の形成実験についても道筋を付けられたといえる。

[発表論文]

1. 大寺 康夫, “キラルナノグレーティングの分光計測への応用(II),” 信学技報 vol. 114, no. 430, pp. 163-168 (2015).
2. 大寺康夫, “ナノフォトニック構造計算における FDTD 法の精度について,” 信学技報 vol. 115, no. 33, pp. 19-24 (2015).
3. 大寺康夫, “近赤外 BPF 用平板キラル・メタマテリアル中の電磁界,” 信学技報 vol. 115, no. 141, pp. 95-99 (2015).
4. 37. 大寺康夫, “近赤外 BPF 用平板キラル・メタマテリアル中の電磁界(II),” 信学技報 vol. 115, no. 213, pp. 33-37 (2015)..
5. 7. Y. Ohtera, “Passive light control elements utilizing photonic sub-wavelength structures,” Nano Science and Technology 2015 (Nano S&T 2015), Xi'an, China, Session 103, Sept. 25, 2015 (Invited).
6. 大寺 康夫, “平板型キラル・メタマテリアルを用いた BPF の透過スペクトルの構成材料依存性,” 信学技報 vol. 115, no. 430, pp. 165-168 (2016).

【7】 世界最小の 5 軸制御磁気浮上モータを用いた小児用人工心臓の研究開発

研究者 茨城大学工学部 助教 長 真啓

茨城大学工学部 教授 増澤 徹

〔研究の概要〕

既開発の磁気浮上型小児用人工心臓試作機は、高い磁気支持性能と小児人工心臓として十分なポンプ性能を示したが、患者の体内へ植え込むには更なる小型化が必要であった。本研究では、小児用人工心臓試作機の性能評価結果と三次元磁場解析を活用して磁気浮上モータを超小型化し、世界最小の次世代型小児用人工心臓の実現に挑戦して以下の結果を得た。①外径 22 mm、高さ 33 mm、体積 13 cc の世界最小の 5 軸制御磁気浮上モータを実現した。②開発した磁気浮上モータが十分な磁気支持力、回転トルクを発生可能であることを実証した。③5 軸制御を行い回転数 1600 rpm まで浮上ロータを非接触磁気支持可能であることを確認した。

〔研究経過および成果〕

1. 小児用人工心臓用 5 軸制御磁気浮上モータ概要

本研究で提案した小児用人工心臓用 5 軸制御磁気浮上モータは、同一構造の上部ステータと下部ステータにより浮上ロータを軸方向に挟み込む構造をとる(図 1)。ダブルステータ型を採用することで二つのモータステータのみを用い浮上ロータ姿勢の 5 軸制御を可能とし、モータの小型化を実現する。本磁気浮上モータの目標性能は、小児用人工心臓の動作点である揚程 100 mmHg、流量 1.5 L/min 発生時に生じるポンプ内流体力、負荷トルクに対抗できることとした。有限要素法三次元磁場解析によるモータ発生磁気吸引力、トルクの推定結果をもとに、モータの最外径を 22 mm、高さを 33 mm、ステータ突極数を 6 突極、ロータ永久磁石極数を 4 極、コイル巻き数を 66 巻きと決定した。図2に小児用人工心臓への適用を目指して超小型化した 5 軸制御磁気浮上モータを示す。

2. 磁気浮上モータの発生磁気支持力静特性評価

製作した 5 軸制御磁気浮上モータの軸方向吸引力、径方向吸引力、傾き復元トルクの静特性を評価した。

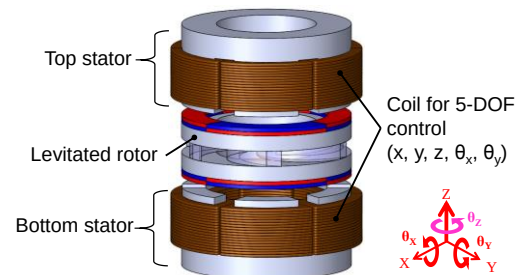


図1 小児用人工心臓用 5 軸制御磁気浮上モータ

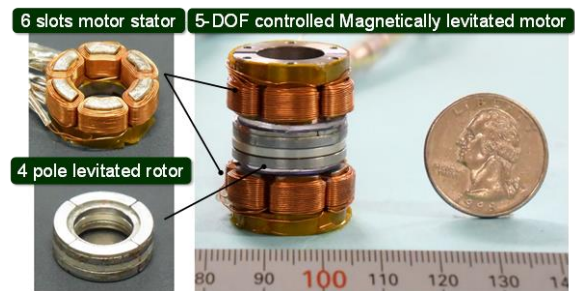


図2 製作した超小型 5 軸制御磁気浮上モータ

制御コイルへ印加する励磁電流あたりのモータ発生軸方向吸引力は 1 N/A、径方向吸引力は 0.2 N/A、傾き復元トルクは 4.7 mNm/A であった。提案原理を用いて設計通りの磁気支持力を発生可能であることを確認した。また、本モータは、軸方向、径方向にロータ質量(11 g)の2倍以上の重量を磁気支持可能であり、十分な磁気支持性能を有していた。

3. 磁気浮上モータの回転トルク評価

片側のステータを用いて回転数 5000 rpm までロータを回転可能であることを確認した。本モータのトルク定数は 4.6 mNm/A であった。また、小児用人工心臓の目標ポンプ性能(回転数 4000 rpm, 揚程 100 mmHg, 流量 1.5 L/min)より算出した必要トルク 2.0 mNm 発生時のモータ効率は 18.6 %であった。本モータは、ダブルステータとすることでトルク増強を図ることができ、十分な回転性能を発揮可能である。

4. 磁気浮上モータの磁気浮上回転制御システム

製作した磁気浮上モータの磁気支持性能評価のために、磁気浮上回転制御システム(図 3)を構築した。本システムでは、浮上ロータの上面、側面に配置した渦電流変位センサにより浮上ロータ姿勢(x , y , z , θ_x , θ_y)を計測し、マイクロプロセッサボードに実装したデジタル PID コントローラで 5 軸制御を行う。

5. 磁気浮上回転性能評価

浮上ロータを 5 軸制御し、回転数を増加させたとときの軸方向、径方向の振動振幅と傾き角度を評価した(図 4)。実験では、浮上ロータの可動域を軸方向に ± 0.3 mm, 径方向に ± 0.5 mm, 最大傾き角度を 1.3 度とした。本磁気浮上モータが回転数 1600 rpm まで浮上ロータを非接触磁気支持できることを確認した。現在、動特性評価をもとに制御ゲインの最適化を行い、更なる高速回転化を目指している。

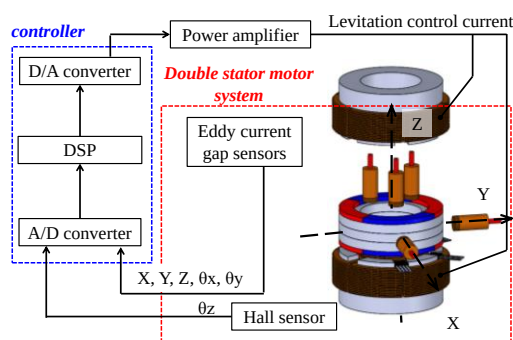
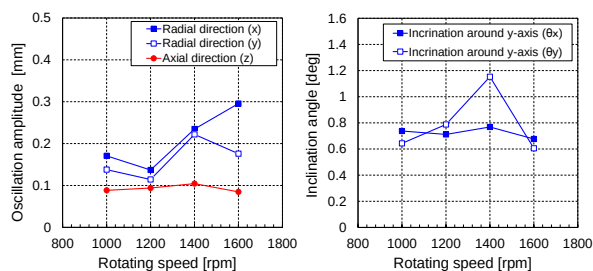


図 3 磁気浮上回転制御システム概要



(a) 軸方向・径方向振動振幅 (b) 最大傾き角度

図 4 浮上ロータ振動振幅と最大傾き角度

6. まとめと今後の展望

磁場解析をもとに、小児用人工心臓用の世界最小の 5 軸制御磁気浮上モータを開発した。モータ発生磁気支持力の静特性評価および回転性能評価より、製作した磁気浮上モータが設計通りの十分な磁気支持、回転性能を有していることを実証した。今後、制御系の最適化と専用血液ポンプの開発を行い、世界初の磁気浮上型小児用人工心臓の実現を目指す。

[発表論文]

1. M. Osa, T. Masuzawa, N. Omori, E. Tatsumi, Characterizing Magnetically Levitated Pediatric VAD and Further Miniaturization of Magnetic System, The 61th Annual Conference of American Society for Artificial Internal Organs, 2015/6/25
2. 斎藤拓也, 増澤徹, 長真啓, 巽英介, 小児用人工心臓用 5 軸制御磁気浮上モータの小型化, 第 23 回茨城講演会, 2015/8/28
3. M. Osa, T. Masuzawa, N. Omori, E. Tatsumi, Miniaturizing 5-DOF fully controlled axial gap maglev motor for pediatric ventricular assist devices, Proc. of ISEM2015, 2015/11/18
4. 長真啓, 増澤徹, 巽英介, 次世代型磁気浮上式小児用補助人工心臓の開発現状, 第 53 回人工臓器学会大会, 2015/11/21

【8】透過・反射同時測定テラヘルツ時間領域分光装置開発と

それを用いたラマン不活性ソフトモードの研究

研究者 筑波大学・数理物質系 助教 森 龍也

〔研究の概要〕

本研究ではテラヘルツ時間領域分光の透過法と反射法を用いた光学系の構築と、透過法と反射法の結果を組み合わせ、誘電体のラマン不活性のソフトモードの研究を行った。主に透過法による成果として、初期強誘電体(量子常誘電体)の BaZrO_3 において、従来見逃されていた付加的なソフトモードをテラヘルツ帯に観測した。このことは BaZrO_3 において局所的対称性の低下を示唆する。観測された誘電率の実部の温度依存性は Barrett の式に良く従い、このことから BaZrO_3 がソフトモードを持つ初期強誘電体(量子常誘電体)であることがわかる。

〔研究経過および成果〕

強誘電体のソフトモードは、中心対称性を有する常誘電相において、赤外活性かつラマン不活性となる。このことから、遠赤外分光による実験的な研究が必要となり、大きな振動子強度の為に反射率が高いソフトモードを検出するには、反射法が必須となる。しかし、近年有力なテラヘルツ帯分光手法として確立されてきたテラヘルツ時間領域分光(terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS)では、反射法は普及していない。これは、光学系の設置の困難さと、THz-TDS 特有の位相の問題に因る。THz-TDS は THz 波の電場の時間波形を記録するのだが、この時位相も正確に記録するため、反射分光では試料とリファレンスの位置を、光の進行方向に対して数 μm 以内に精度よく置き直さないと、位相ずれが生じ、これを簡便に克服できない為に測定技術が遅れている状況にある。

本報告では、透過法と反射法によって研究を行っている初期強誘電体(量子常誘電体) BaZrO_3 (BZO) の結果の内、透過法によって観測された付加的なソフトモードについて報告する[発表論文6]。BZO は、

非鉛圧電材料を合成する際のエンドメンバーとして用いられる有望材料の一つであり、また、非常に高い融点(2920°C)と高い化学的安定性を持つために酸化物高温超伝導体の熔解ルツボや薄膜基板材料としても用いられる重要な物質である。一方、量子常誘電性(のうち、初期強誘電性に分類される)という性質を示す物質でもある。本研究では、従来立方晶ペロブスカイト構造を持つと考えられていた BZO の単結晶試料に対し、当研究室で構築した高精度かつ広い温度範囲 THz-TDS を行った結果、これまで存在しないと考えられていた新しいフォノンモードを室温で 2.3THz に検出した(図1)。さらに、そのフォノンモード周波数の温度依存性を追うと、図2上に示すように、モード周波数は低温に向かってソフト化するという非調和性を示した。また、同時にテラヘルツ帯複素誘電率の実部が低温に向かって増大するという振る舞いを検出することにも成功した(図2下)。これらの振る舞いは BZO の量子常誘電性(初期強誘電性)を反映した結果である。新しいフォノンモードが、最も低周波側に確認された理由として考えられるのは、結晶構

造の周期が2倍に増えたために、ブリルアンゾーンが半分のサイズになり、1倍の時よりも低周波側にゆっくりと振動する光学フォノンモードが現われたことによると考えられる。そして、X線回折によって立方晶からの対称性の低下が観測されていないことから、付加的なモードの出現は、物質全体の対称性の低下ではなく、局所的な対称性の低下が生じていることによると考えられる。このような局所的対称性の低下は、リラクサー強誘電体に良く見られる現象であり、もし局所的対称性が低下している場合、第二次高調波発生などの応用展開としても意義深い振る舞いが観測される可能性がある。

現在、反射法によって得たBZOのソフトモードの構造全体に関する論文を執筆中である。

〔発表論文〕

1. S. Koda, T. Mori, S. Kojima, J. Mol. Struct. in press.
“Broadband terahertz dynamics of propylene glycol monomer and oligomers”
2. S. Kojima, T. Mori, Ferroelectrics 485, 13-19 (2015).
“Broadband Terahertz Time-Domain Spectroscopy of Complex Phonon-Polariton Dispersion Relation”
3. S. Koda, T. Mori, S. Kojima, Int. Lett. Chem. Phys. Astron. 62, 15-20 (2015). “Broadband Terahertz Time-Domain Spectroscopy and Low-Frequency Raman Scattering of Propylene Glycol”
4. T. Sasaki, Y. Hashimoto, T. Mori, S. Kojima, Int. Lett. Chem. Phys. Astron. 62, 29-33 (2015).
“Broadband Terahertz Time-Domain Spectroscopy of Archaeological Baltic Amber”
5. T. Shibata, T. Mori, and S. Kojima, Spectrochim. Acta A: Mol. Biomol. Spectrosc. 150, 207–211 (2015). “Low-frequency vibrational properties of

crystalline and glassy indomethacin probed by terahertz time-domain spectroscopy and low-frequency Raman scattering”

6. M. A. Helal, T. Mori, and S. Kojima, Appl. Phys. Lett. 106, 182904 (2015). “Softening of infrared-active mode of perovskite BaZrO₃ proved by terahertz time domain spectroscopy”

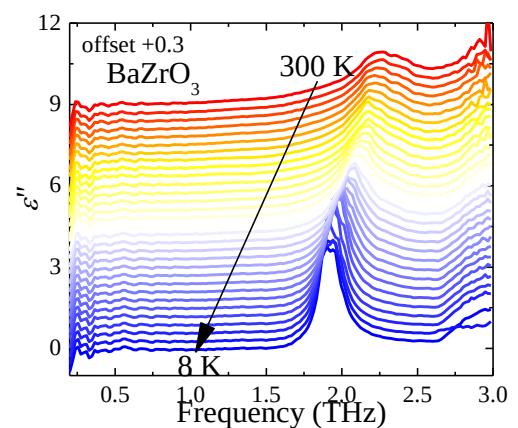


図 1. BaZrO₃ 単結晶の複素誘電率虚部[6]。

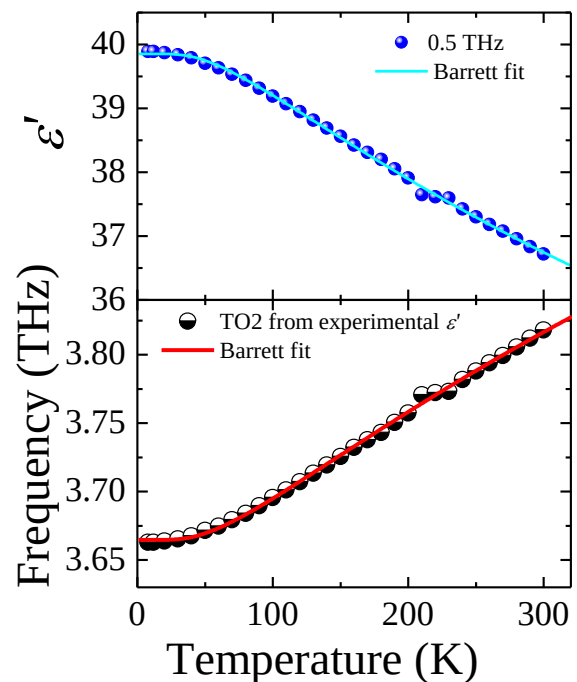


図 2. BaZrO₃ の THz 帯誘電率実部(上図)とソフトモード(下図)の温度依存性[6]。

【9】 量子サイズ効果を利用して有機デバイスの電荷注入準位をチューニングする新手法の確立

代表研究者 東京理科大学理工学部 講師 中山 泰生

共同研究者 千葉大学先進科学センター 教授 石井 久夫

共同研究者 台湾国立清華大学物理学科 教授 Tang Shu-Jung

〔研究の概要〕

有機エレクトロニクス素子の開発において、電極金属と有機半導体材料との接合部における電荷注入特性を最適化することは重要な課題である。本研究では、Ag 超薄膜「量子井戸(QW)」と有機半導体分子との接合部に発生するギャップ内電子準位が量子サイズ効果によって変動する現象を利用し、Ag-QW 電極から有機分子への電荷注入特性の実証と、分子双極子による電子準位制御を試みた。その結果、電極－有機間の正孔注入特性が Ag-QW の厚みによって変化し、ギャップ内準位が分子配向によって制御できることを見出した。

〔研究経過および成果〕

環境負荷の小さい次世代エレクトロニクスとして期待される有機半導体デバイス開発においては、金属電極から有機半導体材料への電荷注入特性の制御が重要な技術的要請となっている。正孔の注入に関しては、電極のフェルミ準位に対する有機半導体の最高占有準位(HOMO)のエネルギー接続が従来から考慮されてきたが、金属－有機接合部分に局所的に形成される「ギャップ内準位」が注入特性に及ぼす役割が最近注目されてきている(図1左)。我々は、厚さ数原子層の Ag「量子井戸(QW)」と有機半導体分子

との接合部に生じるギャップ内準位が、量子サイズ効果によって変動する現象を見出した(図1右)。本研究では、この現象を有機デバイス設計に活用するための基盤技術の確立を目的とした。

「電極」となる Ag-QW は Ge 単結晶清浄表面上に製膜し、その上に有機半導体材料として図2に示した2種類の分子を真空蒸着して試料を作製した。電極から有機半導体への電荷注入特性は、図3挿入図に示したような素子に三角波電圧を印加した際に生じる変位電流変化によって、接合部の電子構造は角度分解光電子分光測定によって、それぞれ評価した。

膜厚の異なる Ag-QW から CuPc 分子層への正孔注入特性を示す変位電流特性を図3に示す。▲で示す電流増加が電極から有機層への正孔注入に対応する。Ag-QW が厚くなると注入閾値電圧が増大するが、

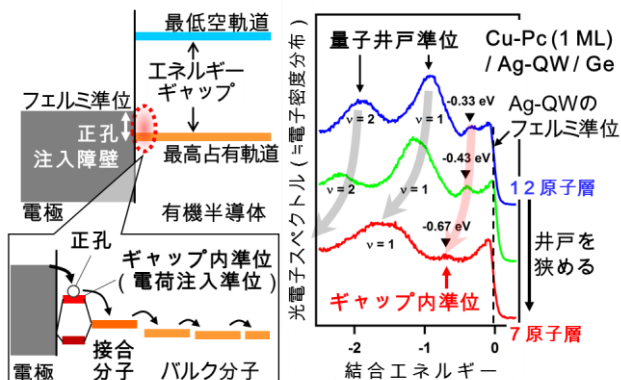


図1: 有機半導体と金属電極との接合部における正孔注入障壁の模式図[左図]、および量子サイズ効果による電荷注入準位(ギャップ内準位)エネルギー変化を示す過去の実験結果[右]

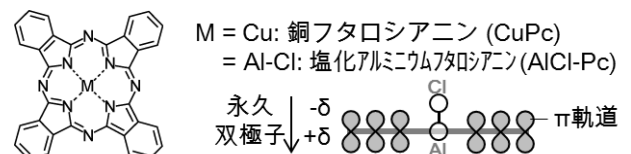


図2: 本研究で有機半導体材料として用いた2種類のフタロシアニンの分子構造[左図]と、AlCl-Pc 分子の構造模式図[右下]

これは接合部の電荷注入準位が電極のフェルミ準位から離れる(図1右)ことに起因すると考えられる。

一方、有機半導体材料をCuPcのような無極性分子から永久双極子をもつAlCl-Pcに換えることで接合部の電子準位調節を試みた。Ag-QW上に吸着配向を制御したAlCl-Pcを1分子層製膜した接合部の電子構造を図4に示す。生じるギャップ内準位のエネルギー(▲)は、CuPcが同じ膜厚のAg-QWに接合した場合(▽)と比べて明確に異なり、極性分子の配向により実際に電荷注入準位を調節できることが示された。

本研究は一貫して台湾国立清華大学物理学科のLin Meng-Kai氏と共同で実施したものである。千葉大学で実施した変位電流計測にあたっては山本紘平氏、土手宏樹氏にご協力頂いた。台湾国立シンクロトロン光研究センターでの光電子分光実験は、Pi Tun-Wen博士およびTang研究室の学生諸氏のご協力のもとで行われた。最後に、研究の実施にあたりご支援をいただいた公益財団法人カシオ科学振興財団に感謝申し上げます。

[発表論文]

1. “Electronic Structures of a Well-Defined Organic

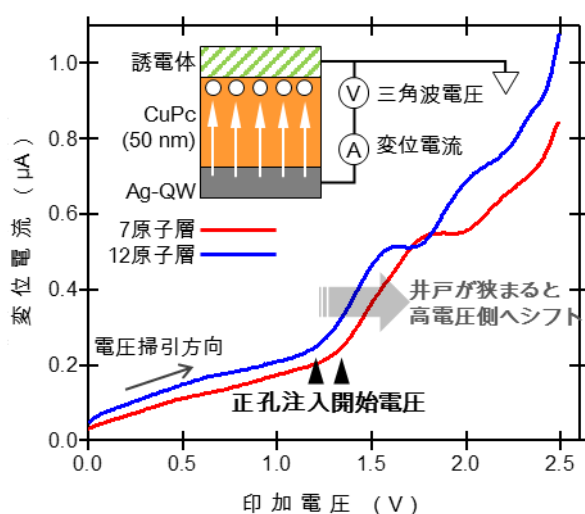


図3: 変位電流法によって見積もられるAg-QW電極からCuPc層への正孔注入特性のQW膜厚依存性

Hetero-Interface: C₆₀ on Pentacene Single Crystal”, Masayuki Yamamoto, Yasuo Nakayama*, Yuki Uragami, Hiroumi Kinjo, Yuta Mizuno, Kazuhiko Mase, Kaveenga Rasika Koswattage, Hisao Ishii (* corresponding author), *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*, **13** (2015) 59–64. (DOI: 10.1380/ejsnt.2015.59)

2. “Photoconductivity-assisted high-resolution C1s photoemission measurements on insulating pentacene single crystal”, Yasuo Nakayama, Yuki Uragami, Masayuki Yamamoto, Keiichirou Yonezawa, Kazuhiko Mase, Satoshi Kera, Hisao Ishii, Nobuo Ueno, *Journal of Physics: Condensed Matter*, *in press*.
3. “Manipulating the dipole layer of polar organic molecules on metal surfaces via different charge-transfer channels”, Meng-Kai Lin, Yasuo Nakayama, Ying-Jie Zhuang, Chin-Yung Wang, Tun-Wen Pi, Theodoros A. Papadopoulos, T. -C. Chiang, Hisao Ishii, S.-J. Tang, *submitted*.

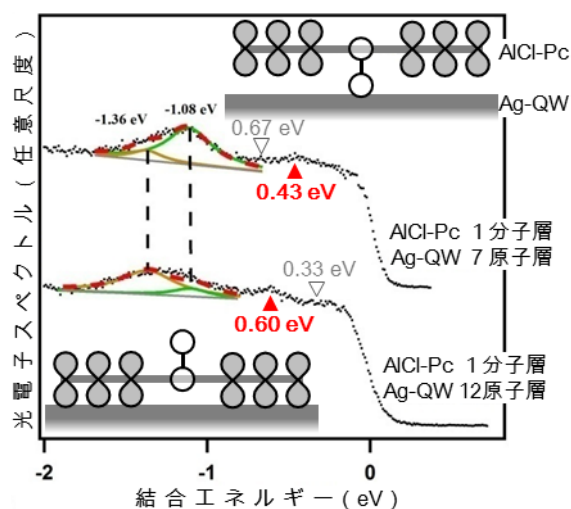


図4: 吸着配向を変化させたAlCl-Pc単分子層とAg-QWとの接合部の光電子スペクトル[投稿中の発表論文3から一部改変して抜粋]。挿入図はそれぞれの接合部における主たる分子配向

【10】 室温無磁場において非散逸伝導を示す界面材料の開拓

研究者 東京大学大学院工学系研究科 助教 打田 正輝

〔研究の概要〕

次世代を担う革新的な省エネルギーデバイスの開発には、エネルギーロスのない非散逸性電流の活用が重要であると考えられる。固体材料内の主な非散逸性電流としては、超伝導電流・量子ホール状態の端電流・トポロジカル量子相の表面電流の三種類が挙げられるが、その産業応用には動作温度・磁場の制約が常につきまとう。近年、ワイル半金属と呼ばれる新しいトポロジカル量子相に対して、無磁場において非散逸性電流を伴う表面・界面金属状態が予測され、その材料探索が盛んに行われ始めている。本研究では、その有力な候補材料として期待されているパイロクロア型イリジウム酸化物界面の伝導特性を調べた。

〔研究経過および成果〕

パイロクロア型イリジウム酸化物($R_2\text{Ir}_2\text{O}_7$)はワイル半金属の有力な候補材料として挙げられ、理論・実験の両面から研究が進められている。特に、時間反転対称性の破れた磁気秩序構造の界面において、トポロジカルな表面伝導状態の検出・応用が期待されている。我々の研究室は、世界で初めてパイロクロア型イリジウム酸化物単結晶薄膜の作製に成功し、ワイル半金属相の発現に重要と考えられている磁気秩序構造(all-in-all-out・all-out-all-in)の磁気伝導現象の解明を進めてきた。本研究では、この材料系における、外部磁場による磁気秩序構造の制御を利用し

たall-in-all-out / all-out-all-in 界面伝導の観測について報告する。

パイロクロア型イリジウム酸化物の単結晶・薄膜の作製は一般に大変難しいとされるが、我々の研究室は、パルスレーザー堆積法・固相エピタキシー法を併用した作製手法を開発し、 $R=\text{Nd, Eu, Tb}$ をはじめとする一連のパイロクロア型イリジウム酸化物について、結晶性の優れた高品質単結晶薄膜を得ることに成功してきた。これらのパイロクロア型イリジウム酸化物のうち、 $\text{Eu}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ 等の R が磁気モーメントを持たない場合には、絶縁体金属転移温度を超えて低温に向かう際の冷却磁場 B_{cool} によって、磁気秩序構造が切り替え

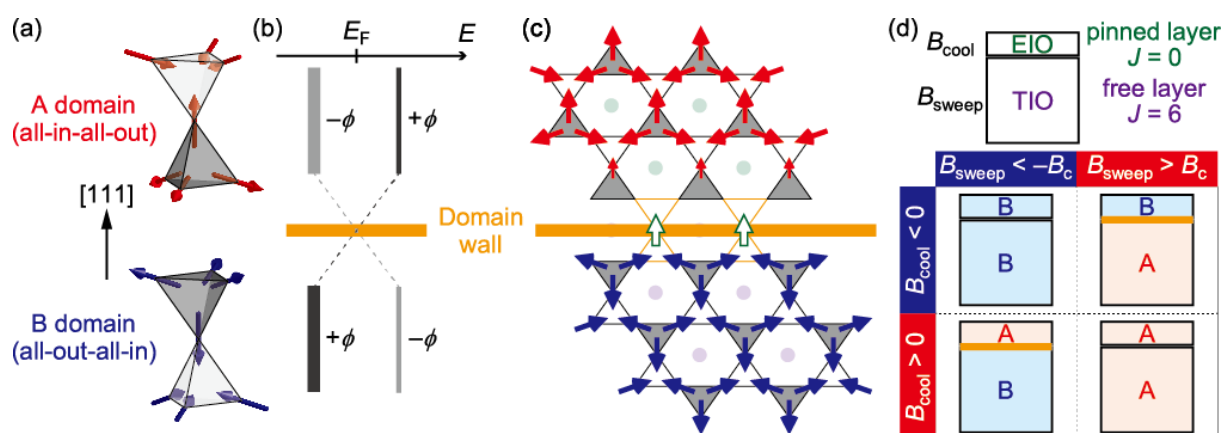


図1. パイロクロア型イリジウム酸化物界面の磁気ドメイン壁において期待されるトポロジカル伝導。

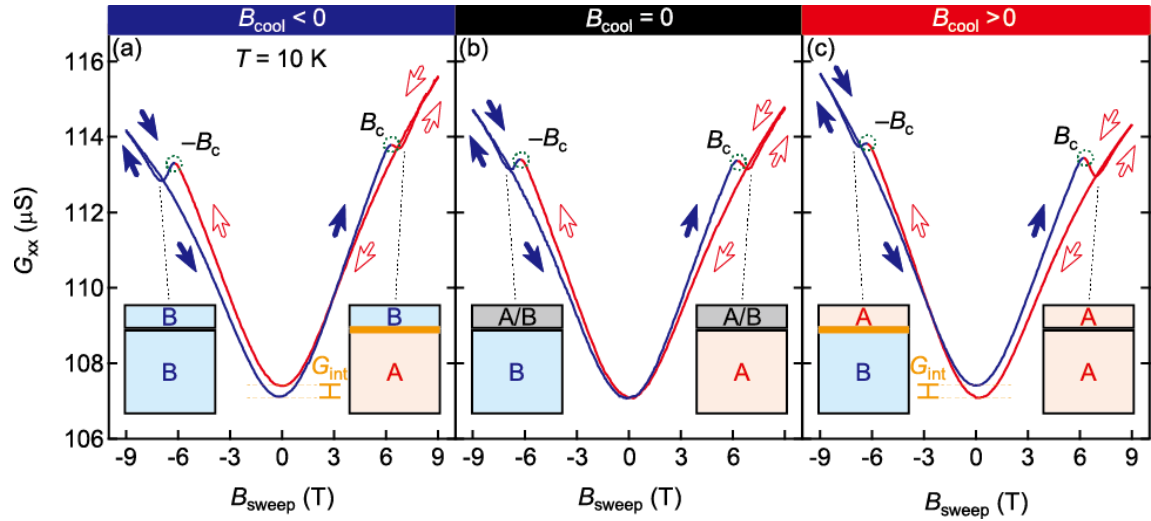


図2. パイロクロア型イリジウム酸化物界面材料において観測された金属伝導。

られる。一方、 $\text{Tb}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ 等の R が磁気モーメントを持つ場合には、 B_{sweep} によって磁気秩序構造が切り替えられる。この違いを利用して、図1に示すように、磁気秩序構造の外部磁場制御を行うことで、パイロクロア型イリジウム酸化物界面材料に all-in-all-out / all-out-all-in 単一磁気ドメイン壁を人工的に作製し、その伝導状態を調べる実験が可能になった。実際に、挿引磁場 B_{sweep} に対する応答の異なる二種のパイロクロア型イリジウム酸化物からなるヘテロ接合($\text{Tb}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ / $\text{Eu}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$)を作製し、all-in-all-out / all-out-all-in 磁気ドメイン壁の形成に伴う界面伝導の観測を試みた。

図2には、冷却磁場 $B_{\text{cool}}=9\text{T}$ によって $\text{Eu}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ 層を all-in-all-out 構造に固定しながら、挿引磁場 B_{sweep} によって $\text{Tb}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ 層の磁気秩序構造を all-in-all-out と all-out-all-in とで切り替えた際に観測された界面伝導を示している。ヘテロ界面が all-in-all-out / all-out-all-in の単一磁気ドメイン壁となった際には、約 $0.4 \cdot S$ の伝導の増加が挿引磁場によらず観測された。これは、ワイル半金属材料の界面において予測されているトポロジカルな伝導状態であると解釈される。また、温度依存性の測定を別途行うことで、確か

に金属的な界面伝導が現れていることが確認された。今後、観測された界面伝導の非散逸性の測定等を行うことで、トポロジカル界面伝導を利用したデバイス応用への道が拓けると期待される。

[発表論文]

1. T. C. Fujita, Y. Kozuka, M. Uchida, A. Tsukazaki, T. Arima, and M. Kawasaki “Odd-parity magnetoresistance in pyrochlore iridate thin films with broken time-reversal symmetry” *Scientific Reports* **5**, 9711 (2015).
2. T. C. Fujita, M. Uchida, Y. Kozuka, W. Sano, A. Tsukazaki, T. Arima, and M. Kawasaki “All-In-All-Out Magnetic Domain Wall Conduction in Pyrochlore Iridate Heterointerface” *submitted*.
3. T. C. Fujita, M. Uchida, Y. Kozuka, S. Ogawa, A. Tsukazaki, T. Arima, and M. Kawasaki “All-in-all-out magnetic domain size in pyrochlore iridate thin films as probed by local magnetotransport” *submitted*.

【11】 空气中で駆動可能な拮抗筋アクチュエータの創出

研究者 東京大学生産技術研究所 助教 森本 雄矢

〔研究の概要〕

本研究では、①拮抗筋アクチュエータの駆動制御、および②空气中での拮抗筋アクチュエータの駆動の実現、を目指した。①の拮抗筋アクチュエータの駆動制御については、拮抗筋における各骨格筋の端部とリンク機構の間に腱様構造を設けることで、骨格筋の収縮運動制御により最大約 80 度のリンク機構の回転を伴ったアクチュエータの駆動が実現可能になることを実証した。加えて、電気刺激の強さを調整することで駆動量が制御可能なことも明らかにした。さらに、②の空气中での駆動については、生体適合性のあるパリレン膜を拮抗筋構造の周囲に覆うように設けることで、骨格筋の保護が可能となり、空气中にて電気刺激に応じた骨格筋の収縮運動による拮抗筋アクチュエータの駆動が実現可能なことが示された。

〔研究経過および成果〕

体外にて構築された 3 次元骨格筋組織は、質量当たりの高い出力とエネルギー効率から生体模倣ロボットの駆動素子として工学分野への応用が期待されている。3 次元骨格筋組織を骨格筋アクチュエータとして応用する試みはこれまでも行われていたが、従来方法で作製された骨格筋アクチュエータは単一の骨格筋のみを使用しており、複数の骨格筋で構成された生体のような伸張・収縮運動を行うことが困難であった。加えて、骨格筋アクチュエータの駆動は培養液中のみに限られており、生体の手足のように空气中での駆動を実現するのは困難であった。

そこで、本研究では 2 つの骨格筋組織が組み合わさった拮抗筋アクチュエータの実現と、生体適合性のある素材の膜で拮抗筋構造を覆うことによる空气中での駆動の実現を目指した(図 1)。拮抗筋構造では両筋肉の間に張力の釣り合いが取られることにより、骨格筋の短縮が防止され、骨格筋の収縮・伸張運動が実現できる。また、2 つの骨格筋の間における収縮力の差によって、アクチュエータの駆動が制御できると

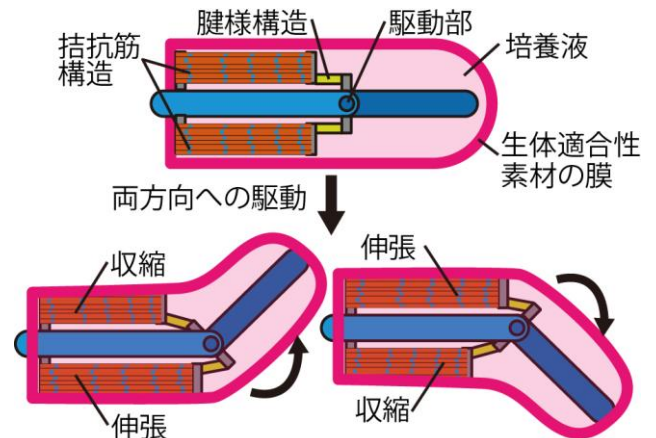


図 1 提案の拮抗筋アクチュエータの概念図

考えられる。上記の拮抗筋アクチュエータを生体適合性がある素材の膜により覆うことで、空气中においてもアクチュエータが駆動可能となる。

本研究の成果として、まず拮抗筋アクチュエータの構築および駆動制御を実現した。拮抗筋アクチュエータの構築にあたり、まずラット新生児後肢から分離した筋芽細胞をハイドロゲル溶液に分散させた。このハイドロゲル溶液をシリコンゴムスタンプで押し付けパターニングした状態にてゲル化させて、筋芽細胞含有ハイドロゲルシートを作製した。この筋芽細胞含有ハイドロゲルシートを、拮抗筋アクチュエータ用デバイスの表・裏両面から積層させた(図 2)。この拮抗

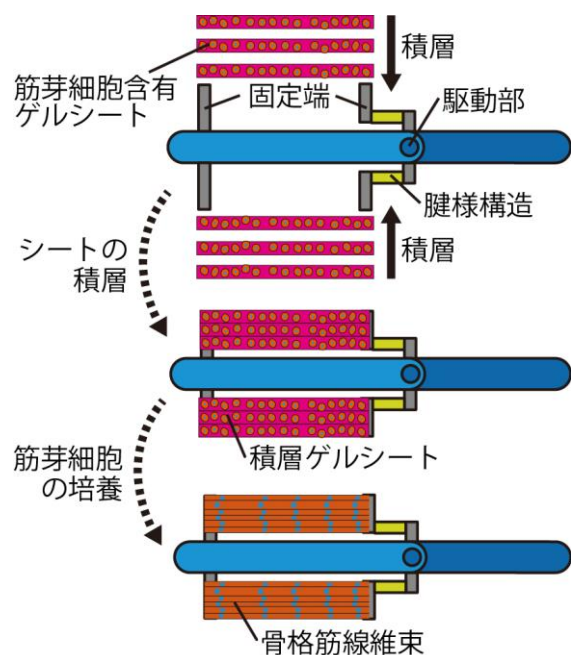


図2 拮抗筋アクチュエータの作製方法

筋アクチュエータ用デバイスはリンク機構の駆動部と腱様構造、固定端から成っており、積層されたゲルシートは固定端によって外れないようになっている。最後に筋芽細胞を融合させ筋線維を形成し、骨格筋線維束を構築した。

この時、パターンしたゲルの幅が短いと筋芽細胞の遊走量が少なくなり、骨格筋線維が構築しやすくなるという結果を得られており[1]、高さ・幅 500 μm にパターンされたハイドロゲルシートを用いて拮抗筋アクチュエータの構築を行った。作製された拮抗筋アクチュエータの各骨格筋線維束に選択的に電気刺激を負荷することで、各々の骨格筋線維束の収縮運動を制御させることが可能となり、拮抗筋アクチュエータにて各々の骨格筋の収縮・伸張の実現に成功した。この時、リンク機構である駆動部の回転量は最大で約 80 度に達し、その駆動量は電気刺激量により制御可能であることが明らかになった。

作製した拮抗筋アクチュエータを空气中で駆動可能にするため、袋状パリレン膜で拮抗筋構造を覆い

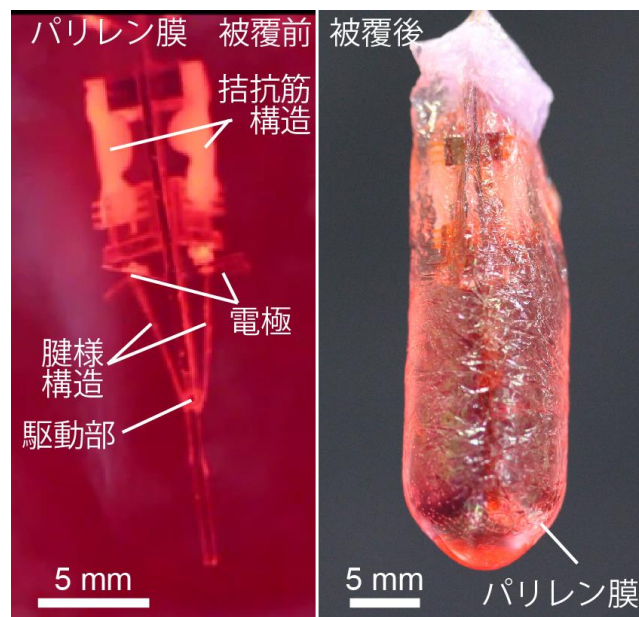


図3 作製した拮抗筋アクチュエータ

空気層からの分離を行った(図3)。本実験には、レジストを塗布したガラス管上にパリレンを製膜し、レジストを除去した後に形成される袋状パリレン膜を使用した。この袋状パリレン膜を拮抗筋アクチュエータに被せて、パリレン膜端部とアクチュエータを医療用接着剤で接着させることで一体化させた。このようにして作製したアクチュエータに付属の電極を介して電気刺激を送ることにより、空气中での拮抗筋アクチュエータの駆動の実現に成功した。

今後は、将来的に実用可能な拮抗筋アクチュエータの実現を目標とし、更に駆動量が大きい拮抗筋アクチュエータならびに生体と同様に空气中で駆動可能なアクチュエータの実現を目指していく。本研究の成果は骨格筋アクチュエータの基盤技術として、活用されると期待している。

〔発表論文〕

1. Yuya Morimoto and Shoji Takeuchi, "Skeletal muscle on a chip for *in vitro* analyses of muscle formation at single cell level", Proc. Of The 18th MicroTAS, pp. 737-739, Korea, Oct. 2015

【12】 動的自己活性化分子性電磁ナノコイルの開発

研究者 東京農工大学大学院工学研究院 応用化学部門 講師 帯刀 陽子

〔研究の概要〕

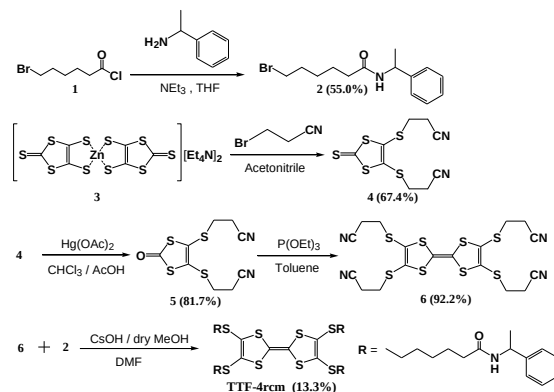
多くの有機金属および超伝導体は、電荷移動錯体を用いたカチオン・ラジカル塩類で報告されている。Tetrathiafulvelene(TTF)は自己組織化することで分子集合体を形成し、またアクセプター分子と組み合わせることで、室温で高導電性を示すことが既に知られている。本研究では、半導体デバイス形態の1つとして注目を集めている1次元組織体の作製、更には、組織体をらせん状へと変化させた分子性電磁コイルの作成とそれらのナノ物性の解明を目指して、「キラル部位」と「水素結合部位」を導入した側鎖を導入した TTF 誘導体を合成した。これらの TTF 誘導体は、アクセプター分子であるF4TCNQと組み合わせることで導電性を発現させた。作製した錯体について、光学スペクトル測定により電子状態を明らかにし、AFM 測定によりこれらの TTF 誘導体は自己組織化し分子集合体を形成していることを確認した。

〔研究経過および成果〕

ナノテク材料分野は、重要な研究推進分野と位置づけられている。その中でも特に、分子レベルで電気的特性を操作する分子エレクトロニクス分野は、複合多機能性デバイス開発への展開から多くの研究者の注目を集めている。電気的特性を発現するための手段として、電荷移動錯体に基づく導電性の分子性薄膜や分子集合体などを用いることが考えられる。金属伝導を示す TTF-TCNQ (Tetra-cyanoquinodimethane) 錯体などを含む分子性導体は、半導体から金属、超伝導に至る多様な伝導物性を示すことが知られている。更に、単一分子では達成できない分子間の相互作用や、多数の分子による協同現象に基づく機能を利用できることが特徴的な点であり、分子エレクトロニクスデバイスを作成する上で必要不可欠な要素となる。分子の自己集積化を利用した分子性導体のナノ材料化により、様々な電子状態を有する興味深いナノ構造を実現できる可能性がある。ナノワイヤやナノコイルは、分子エレクトロニクス実現のための基本的

な部品としてその開発に大きな注目が寄せられ、応用へ向けての研究が国内外で活発に行われている。

そこで、本研究では、TTF 分子に水素結合部位とキラル分子を付与した新規 TTF 誘導体(TTF-4rcm)を合成した(Scheme 1)。合成した TTF-4rcm は3つの機能性部位から構成されている。TTF ユニットの伝導性の発現、水素結合部位は1次元組織体の形成を促進、キラル分子部位は螺旋構造の形成のために導入した。はじめに、分子集合体の構造を詳しく調べるために AFM を用いてナノ構造を観察した(図 1)。



Scheme 1. TTF 誘導体(TTF-4rcm)の合成

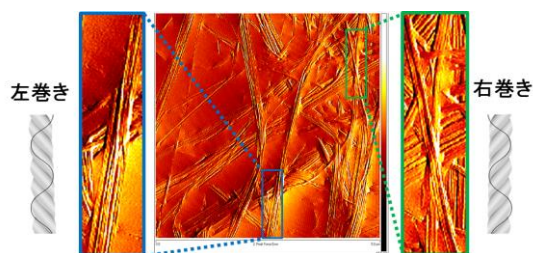


図 1. TTF 誘導体(TTF-4rcm)からなる分子性
ナノコイルの AFM 像

AFM 像より、TTF-4rcm は幅が数十ナノメートル、
長さが $20\ \mu\text{m}$ 以上のナノコイルを形成している
ことが明らかとなった。また、1 本の 1 次元組織
体の中に細いナノコイルが数本ずつ観察され、右
巻きのナノコイルと左巻のナノコイルが 1:1 で存
在していることが分かった。

次に、TTF-4rcm と F₄TCNQ を混合することで
電荷移動錯体を作製した。この錯体の電子状態を
明らかにするために、IR、UV-vis-NIR スペクトル
測定を行ったところ、IR スペクトルからは
 $2500\text{--}3500\ \text{cm}^{-1}$ に Charge-Transfer に由来する吸収
が得られ、UV-vis-NIR スペクトルからは $700\text{--}900\ \text{nm}$
に TCNQ のアニオンラジカルの吸収と 400nm
に TTF のカチオンラジカルに相当する吸収が得
られた(図 2)。以上の事から、TTF-4rcm と F₄TCNQ
は電荷移動錯体を形成し、完全電荷移動状態を形
成していることが明らかとなった。

TTF-4rcm と F₄TCNQ 錯体のバルク状態での電
気伝導度は、金電極を蒸着したガラス基板に錯体
をキャストした試料について 2 端子法を用いて測
定した。錯体は室温で直線的な I-V カーブを示し、
伝導率は $8.3 \times 10^{-4}\ \text{S/cm}$ であり、活性化エネルギ
ーは $E_a = 0.27\ \text{eV}$ であった。

我々は、TTF に水素結合部位とキラル分子を付

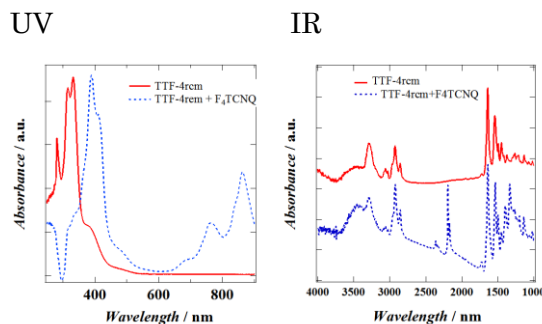


図 2. TTF-4rcm と F₄TCNQ 錯体の IR、
UV-vis-NIR スペクトル

与した新規化合物 TTF-4rcm を合成した。
TTF-4rcm は水素結合を利用することで 1 次元構
造を形成し、キラル分子の立体障害を利用するこ
とで分子性ナノコイルを得た。分子性ナノコイル
は、 $20\ \mu\text{m}$ 以上の長さを有していた。また、
F₄TCNQ と混合させることで得られた電荷移動錯
体の伝導率は $8.3 \times 10^{-4}\ \text{S/cm}$ であり、活性化エネ
ルギーは $E_a = 0.27\ \text{eV}$ であった。このような分子
性ナノコイルは分子エレクトロニクス分野にお
いて重要なパーツとなると考えられる。

[発表論文]

1. M. Suzuki, T. Ikeda, Y. Tatewaki, S. Okada,
“Properties of Some Polarized Chromophores in
Polyvinylpyrrolidone”, Mol. Cryst. Liq. Cryst.,
Liquid Crystals, 621:1, 96-101 (2015).
2. A. Fujimori, R. Yamato, T. Kikkawa, Y. Tatewaki,
“Morphological transition of a conductive
molecular organization with non-covalent from
nanonetwork to nanofiber”, J. Colloid Interface
Sci., 448, 180-188 (2015).

【13】 今後の ICT の成長に不可欠な, 広帯域・低消費電力無線通信用

デルタシグマ A/D 変換 LSI の新設計法

山梨大学 工学部 助教 兼本 大輔

〔研究の概要〕

広帯域信号処理・低消費電力動作が可能なデルタシグマ A/D 変換 LSI の設計法に関する研究を実施した. デルタシグマ A/D 変換 LSI に利用されるデルタシグマ変調器は, ループフィルタや量子化器等から構成される. 本報告書では, ループフィルタ内に存在する積分器の係数と, 量子化器利得の関係に着目することで, 積分器回路に求められる仕様を緩和できる設計方法を, 信号帯域 25MHz の連続時間型デルタシグマ変調器を例に報告する.

〔研究経過および成果〕

近年, ICT の急激な進歩により, 大容量通信が可能なモバイル機器の需要が飛躍的に高まっている. その背景に伴い, 広帯域の信号を高精度に変換し, 低消費電力で動作する A/D(Analog-to-Digital)変換技術に関心が集まっている. なかでも, 連続時間型デルタシグマ変調器を応用した低消費電力で動作する A/D 変換 LSI の設計方法に関して, 大学や企業などで幅広く研究が進められている. 多くの A/D 変換 LSI は, 製造コスト等の観点から, 主に CMOS プロセスを用いた実装が選択されている. 今までは, CMOS 微細加工技術の進化(スケーリング則)が, 高速 A/D 変換回路の特性向上の一端を担ってきた. しかし, 今後はその微細化に限界が生じると予想されており, 微細加工技術だけに頼らずとも, 回路の特性を向上させる, 新たな設計方法を提案する必要がある.

デルタシグマ変調器は, 主に「オペアンプを有するループフィルタ」と「量子化器」等から構成される. デルタシグマ変調器において, 電力の大半はループフィルタで消費されることが一般的である. ループフィ

ルタの広帯域化が求められるにつれ, 積分器内に利用されるオペアンプの広帯域要求が過度に進んだ結果, 変調器の帯域増加以上に消費電力が増大する問題が浮上している. そこで本研究では, ループフィルタの後段に位置する量子化器の利得に着目し, 得られる SQNR (Signal-to-Quantization Noise Ratio) は一定のもと, オペアンプに求められる仕様を緩和するためのデルタシグマ変調器の新設計方法に関して研究を行った.

特に, CIFF(Chain of Integrators with weighted FeedForward summation)型デルタシグマ変調器では, 初段のオペアンプはシステムを安定に動作するために広帯域設計, すなわち積分器係数を大きく設計することが求められる. 確かに, 広帯域動作が可能なオペアンプの利用は, 二段目以降の積分器より発生する雑音を抑える目的には有利である. ただし, システム安定化だけを目的とした広帯域積分器の利用は, 消費電力の観点から好ましくない.

そこで, 得られる SQNR が一定のもと, 量子化器の利得と初段の積分器係数が反比例の関係にある事

を利用し、量子化器利得を増加させることで積分器係数に関わる要求が緩和出来る方法に着目した。ただし量子化器利得の増加(求められる積分器係数の減少)により入力換算雑音の増加や、量子化器のしきい値オフセットの影響が課題になるため、最適な設計指針を立てる必要がある。本研究では、設計指針解明を行い、その指針を用いた設計例を示す。

本紙では、信号帯域が 25MHz、サンプリング周波数が 800MHz の変調器を対象とした。今回の設計では CIFF 型 3 次の連続時間型デルタシグマ変調器を対象とした。8 レベルで判定が可能な量子化器を用いて検証を行った。初段の積分器には、1k Ω の抵抗、930fF の容量を有するアクティブ RC 積分器を用い、内部のオペアンプの出力範囲を 800mVpp とした。図 1 は雑音を考慮した本変調器のシミュレーション結果であり、本出力スペクトルの結果より変調器動作が確認出来る。

図 2 は、量子化器利得を 0.5 から 3 に変更した場合(積分器係数もループゲインを一定にするために変化)の SNR(Signal-to-Noise Ratio)を示している。それぞれの実線は量子化器が有するしきい値ばらつきの分散値を示している。-6dBFS 入力時において、変調器が発振した場合、Unstable として判定した。つまり Stable な状態かつ SNR の劣化が許容できる範囲で大きい量子化利得を採用すれば、もっとも積分器係数を下げることが出来る。たとえば、図2の結果より、ばらつきの標準偏差値が $\sigma=7.5\text{mV}$ の場合、量子化器利得を2倍で設計すれば、SNR が 0.7dB 程度悪化はするが、求められる積分器係数の要求を半分にまで緩和出来る事が分かる。今後は LSI の試作を含めた検証を行い、本研究を進める予定である。

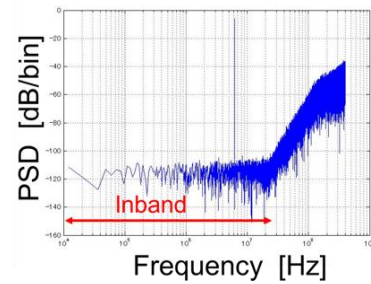


図 1: 出力スペクトルの結果

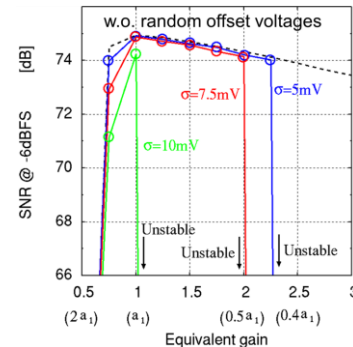


図2: 量子化器利得、積分器係数および SNR の関係

(シミュレーション結果より算出)

[発表論文]

1. 兼本大輔, 佐藤隆英, 大木真, "内部 A/D 変換器の等価ゲインを活用したデルタシグマ変調器," 電子回路研究会, 014-102, 2014 年 12 月
2. Daisuke Kanemoto, Naoki Fukasawa, Takahide Sato, and Makoto Ohki, "A 3rd Order Delta-Sigma Modulator Utilizing Equivalent Gain of Internal Multi-bit ADC," IEEE Symposium on Low-Power and High-Speed Chips COOL Chips XVIII, no 18, April 2015.
3. Daisuke Kanemoto, and Makoto Ohki, "A CT Delta-Sigma Modulator Design Technique with Equivalent Gain of Multi-bit ADC Having Random Offset Voltage due to Device Mismatch," 2015 IEEE/ACM Workshop on Variability Modeling and Characterization, pp.1-2, Nov. 2015.

【14】 分子配向技術の導入による非線形光学ナノ光デバイスの高性能化

研究者 静岡大学工学部 准教授 杉田 篤史

〔研究の概要〕

本研究では、著者らの提案する非線形光学ナノ光素子の高性能化に挑戦した。提案システムは、表面プラズモン効果によりサブ波長空間に高密度光電場を発生させるための金属ナノ粒子とその上に積層した非線形光学ポリマー薄膜より構成される。本研究の狙いは、非線形光学ポリマーを構成する色素分子を金属ナノ粒子表面で吸着配向させ、金属ナノ粒子の非線形光学特性を実効的に増大させることにより、ナノ空間で高効率な非線形光学動作を実現させることにある。研究の結果、非線形光学ポリマーを積層した金属ナノ粒子は表面プラズモン共鳴励起条件下において非線形光学波長変換効率を5倍ほど増強させることに成功した。

〔研究経過および成果〕

図 1(a)に提案する金属ナノ粒子/非線形光学ポリマー複合型非線形光学ナノ光素子の構成を示す。素子は、表面プラズモン励起のためのロッド形状の金ナノ粒子とその表面を覆う非線形光学ポリマーより構成される。金ナノロッドの表面プラズモン共鳴波長は、ロッドの長軸 L と短軸 W のアスペクト比 L/W に依存する。表面プラズモン共鳴波長と励起波長との離調が非線形性に及ぼす役割を解明するため、様々なアスペクト比の金ナノロッドを製作した。また、ガラス基板上には $150\ \mu\text{m}$ 四方の領域に同一形状の金ナノロッドを一定の間隔 $A=200\ \text{nm}$ で二次元的に周期的に配置した (図 1(b))。分光実験の際には、試料上における多数の金ナノロッドをまとめて励起し、その集団平均より金ナノロッド 1 個当たりの性能を算出した。

非線形光学ポリマーは、ゲストホスト型と呼ばれる複合物質である。この材料は、光との非線形光学相互作用を担うゲスト色素分子とそれを固定するホストポリマーより構成される。非線形光学ポリマーは、ゲスト色素をホストポリマー中に分散させただけでは色素

が乱雑に配向し反転中心を持った構造をとるため、非線形光学特性を示さない。通常、非線形光学活性とするためにポリマー中に高電圧を印加し、ゲスト色素を極性配向させる。しかし、微細な構造の金属ナノ粒子に対して数 kV という高電圧を印加することは現実的ではない。本研究では、色素の金属ナノ粒子に対する吸着相互作用を利用してポリマー中のゲスト色素を極性配向させることを試みた。

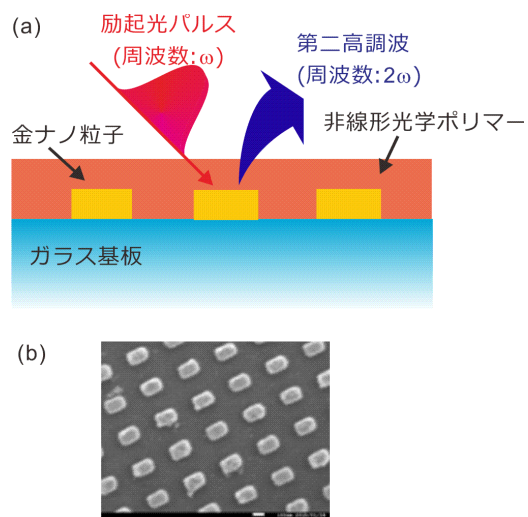


図 1:(a)金属ナノ粒子・非線形光学ポリマー複合型非線形光学ナノ光素子の構成。(b)金ナノロッドの SEM 画像。

図2に本研究で利用したゲスト色素分子の構造および吸収スペクトルを示す。いずれの色素も電子供与体である三級アミンには 2 個の水酸基(OH)が結合している。この水酸基が金属表面への吸着相互作用の駆動力となる。これらのゲスト色素分子はホストポリマーであるポリメチルメタクリレート中に分散させ、金ナノロッド表面に積層した。

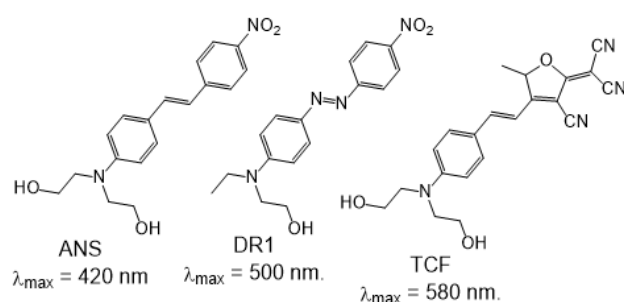


図 2: 検討したゲスト色素の構造

ナノ光素子の非線形光学特性は、第二高調波法によって評価した。この分光法では、試料に励起光であるフェムト秒光パルスを照射し、非線形光学相互作用の結果、励起光の二倍の周波数を持つ第二高調波光を検出する。本研究ではモードロックチタンサファイアレーザーより発振する光パルス(中心波長:800nm、パルス幅 100fs、パルスエネルギー5nJ、繰り返し周波数 75MHz)を利用した。

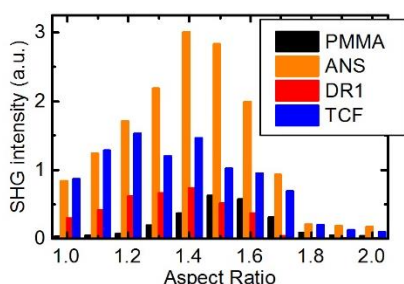


図 3: モデルシステムの放射する第二高調波光強度のアスペクトに対する依存性。

図 3 に製作したナノ光素子より放射される第二高調波強度の金ナノロッドのアスペクト比に対する依存

性を示す。比較のため、ゲスト色素を分散していないポリマー薄膜のみを積層した系についても検討した。色素の有無および色素の種類によらず、アスペクト比が 1.4-1.5 付近で最も高効率な第二高調波発生を観測した。アスペクト比が 1.4-1.5 の金ナノロッドは、励起光波長である 800nm 付近で最も高い表面プラズモン共鳴効果を示す。従って、表面プラズモンにより非線形性を増強することに成功したと結論できる。

ゲスト色素を分散していないポリマーを積層した比較系の放射する第二高調波発生は、金ナノロッド表面の非線形光学特性によるものである。ゲスト色素を分散させた系からは、いずれの色素を用いた場合にもこの比較系よりも、高強度な第二高調波の発生が確認され、非線形光学ポリマーによって金属表面の非線形光学性を増強させることに成功した。

非線形光学効果の各種応用技術は、現代の光工学を支える最も重要な基盤要素技術の一つである。サブ波長空間での光操作技術を実現する表面プラズモンの微小光学応用技術においても非線形光学への展開は重要な課題である。簡単なプロセスにより金属ナノ粒子表面の非線形性を増大化させる本研究成果は、こうした要請に応えるもので、今後の光工学の発展に大きく貢献するものと確信する。

[発表論文]

1. A. Sugita, T. Hirabayashi, A. Ono, and Y. Kawata, “Enhancing second-order nonlinearity on Au-nanorods at localized surface plasmon resonance with nonlinear optical polymers” Proceedings of SPIE: Plasmonics: Metallic Nanostructures and Their Optical Properties XIII [9547-25] (2015).

【15】 コランダム構造酸化物を用いた高移動度トランジスタ(HEMT)の開発

研究者 京都大学 大学院工学研究科 助教 金子 健太郎

〔研究の概要〕

α -(Al,Ga,In) $_2$ O $_3$ 混晶はバンドギャップ値を 3.7-9.0 eV まで変調させる事が出来、これほど大きなバンドギャップ値変調が可能な半導体の混晶系は他には存在しない。本研究は、 α -(Al,Ga,In) $_2$ O $_3$ 混晶、特に α -Ga $_2$ O $_3$ をベースとした 2 次元電子ガス(2DEG)、そしてそのデバイス応用としての高移動度トランジスタ(HEMT)実現に至るまでに必要なサンプル作製、評価を目標としたものであり、今研究によって以下の成果を得られた。

①out-of-plane 対称面半値幅が 40arcsec、非対称面半値幅が 1200 arcsec 未満の高品質 Sn ドープ α -Ga $_2$ O $_3$ 薄膜の作製に成功し、②Sn ドープ α -Ga $_2$ O $_3$ 薄膜において移動度が 20cm 2 /Vs 近い薄膜の作製に成功した。さらに、③ α -Ga $_2$ O $_3$ / α -(Al,Ga) $_2$ O $_3$ 界面において XPS 測定を用いた詳細なバンドアライメント評価を行い、2DEG 作製の実現可能性を示す重要な結果を得た。

〔研究経過および成果〕

コランダム構造 α -(Al,Ga,In) $_2$ O $_3$ 混晶はバンドギャップ値を 3.7-9.0 eV まで変調させる事が出来、これほど大きなバンドギャップ値変調が可能な半導体の混晶系は他には存在しない。GaN や SiC、ZnO 等の代表的なワイドバンドギャップ半導体はバンドギャップ値が 3.3-3.4 eV であり、 α -(Al,Ga,In) $_2$ O $_3$ 混晶は圧倒的に大きなバンドギャップ値をもつ。この大きなバンドギャップ値は電力変換に用いられるパワーデバイス等の高耐圧素子へ応用した際に高い耐圧を示す事が期待され、電力変換効率の向上や素子の少スペース化が可能となる。

しかしながら、コランダム構造酸化物自体の研究報告は少なく、特に準安定相である α -Ga $_2$ O $_3$ 、 α -In $_2$ O $_3$ 及びその混晶系は、作製自体が非常に困難で、単結晶作製の報告は、現在のところ当研究室の他に数件の報告例しか無い。そのため、その作製及び電子デバイスへの応用研究に前例はなく、

3.7-9.0 eV という非常に大きいバンドギャップをもつ、魅力的な材料であるにも関わらず、その研究は始まったばかりである。本研究では、 α -(Al,Ga,In) $_2$ O $_3$ 混晶、特に α -Ga $_2$ O $_3$ を走行層、 α -(Al,Ga) $_2$ O $_3$ 層を障壁層とした 2DEG 実現を念頭に、以下の点の達成を目標とした。①これまで Sn ドープ α -Ga $_2$ O $_3$ 薄膜の移動度が極めて小さい値(2.8cm 2 /Vs)であった理由を解明し、その移動度の向上を図る事。② α -Ga $_2$ O $_3$ / α -(Al,Ga) $_2$ O $_3$ 界面における詳細なバンド

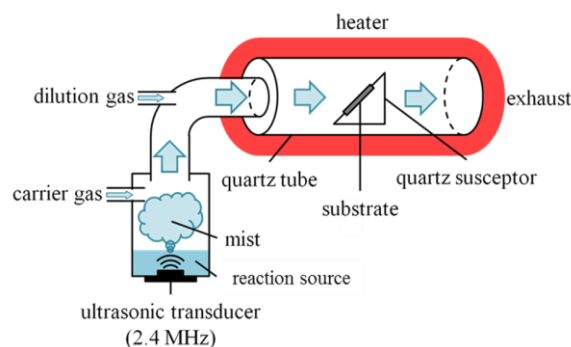


図 1. 管状炉型ミスト CVD 装置の模式図

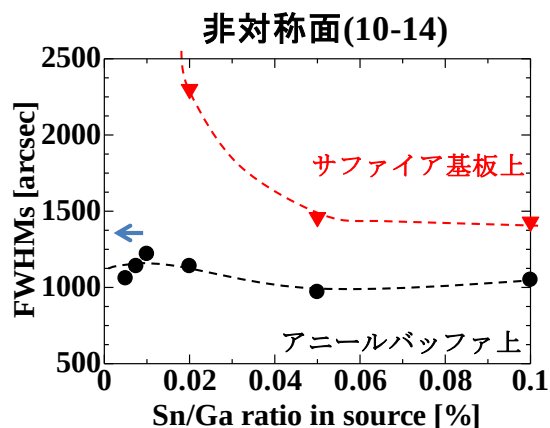


図 2. サファイア基板上及びアニールバッファ上に作製した Sn ドープ α -Ga₂O₃ 薄膜の非対称(10-14)面における X 線ロックンカーブ測定 (XRC) の半値幅と原料中における Sn/Ga 比の相関。図中の矢印はバッファ層の XRC 半値幅。

アライメント測定を行い、2DEG 作製の可能性について検討する。①の点について、今研究で用いた管状炉型ミスト CVD 装置(図 1)による製膜時に用いる、製膜用部品を改良して薄膜の成長速度の増加を達成させ、高品質な厚膜を作製する事に成功した。また、この事から、厚膜のバッファ層を導入する事によって、基板であるサファイア(α -Al₂O₃)と α -Ga₂O₃ 薄膜の 5%近い格子定数差を緩和し、高品質薄膜の作製を行った。

図 2 は、サファイア基板上に直接製膜した Sn ドープ α -Ga₂O₃ 薄膜と、アニールバッファ層上に製膜した Sn ドープ α -Ga₂O₃ 薄膜の、非対称(10-14)面における X 線ロックンカーブ(XRC)測定の半値幅と、原料中における Sn/Ga 比の相関を示したものである。アニールバッファ層は、サファイア基板上に作製した Sn ドープ α -Ga₂O₃ 薄膜の厚膜を 24 時間アニール処理を行い、バッファ層とした。そして、その直上に Sn ドープ α -Ga₂O₃ を製膜した。図 2 より明らかに、アニールバッファ層に作製した Sn ドープ α -Ga₂O₃

薄膜の XRC 半値幅は、バッファ層を用いないものより小さく、面内方向の結晶性が向上している事が示唆される。また、面外の XRC 半値幅の値はどちらも 30-50 arcsec であり、極めて面外配向性が高い、高品質膜である事を確認している。そして、アニールバッファ層上の Sn ドープ α -Ga₂O₃ 薄膜の移動度を測定したところ、20cm²/Vs 近い値を示した。この値は、今までの報告値(2.8cm²/Vs)の 7 倍近い値であり、大幅な移動度の向上に成功した。2DEG のキャリア走行層として用いるためには、さらなる移動度の向上が必要であるが、アニールバッファ層の導入という新しい手法により、大幅に値を向上させる事に成功した。

また、X 線光電子分光 (XPS) 法によって α -Ga₂O₃/ α -(Al,Ga)₂O₃ 界面のバンドオフセットを測定した。その結果、主に酸素の 2p 軌道によって構成される価電子帯よりも、伝導帯の方が Al 組成に対する変化が大きく、n 型半導体をベースとする 2DEG 作製において重要な、伝導帯のバンドオフセットにおいて、Al 濃度が重要な役割を担う事を確認した。

[発表論文]

1. Kazuaki Akaiwa, Kentaro Kaneko, and Shizuo Fujita: "Electrical Property of Sn-doped Corundum-Structured Ga₂O₃ Thin Films on Sapphire Substrates" 42nd International Symposium on Compound Semiconductors, Santa Barbara, USA (June 29, 2015) [Mo4PP-E.21]
2. Kentaro Kaneko, and Shizuo Fujita: "A novel alloy system based on corundum-structured compounds and their device applications" Energy Materials Nanotechnology, Istanbul, Turkey (July 3, 2015) [Invited]

【16】 光反応誘起相分離法による銀ナノワイヤーを用いた透明導電性フィルムの創成

京都工芸繊維大学 高分子機能工学部門 助教 中西 英行

〔研究の概要〕

本研究では、光反応誘起相分離を利用し、ポリマーフィルムに銀ナノワイヤーを集積させる方法について検討した。ポリオール法を用いて合成条件を変化させると、様々なアスペクト比の銀ナノワイヤーが生成した。合成した銀ナノワイヤーは光反応性の高分子溶液に均一に分散させ、紫外光を照射し、モノマーを光重合することによってフィルムを作製した。共焦点レーザースキャン顕微鏡を用いてフィルム内部を観察すると、モノマーの重合過程で混合系は相分離し、二相構造を形成することがわかった。このとき銀ナノワイヤーは片方のポリマーリッチ相に局在し、連結構造を生成することが明らかになった。得られたフィルムの電気伝導率や透過率と内部構造について詳しく調べた。

〔研究経過および成果〕

多くの高分子混合体は非相溶であり、内部に相分離構造を有する。特に、モノマーの重合反応によって引き起こされる相分離は、反応誘起相分離と呼ばれ、相構造の発現機構について数多くの研究が行われてきた。その中でも光を照射してモノマーを重合すると、光の強弱や ON/OFF で反応の速度や開始/停止を操作でき、キネティクスの変化によって多様な相分離構造が現れることが分かっている。¹ 本研究では、熱力学的な駆動力(相分離)を利用してポリマーフィルム内に銀ナノワイヤーを集積させ、少ない濃度で電気伝導性を示すフィルムの開発を目指した。

ナノワイヤーはその一次元的な形状から効率的に電荷を輸送できることが報告されており、エネルギー貯蔵デバイスの電極などに利用されている。² 本研究では、ポリオール法を用いて合成した銀ナノワイヤーを試料にもちいた。攪拌速度と反応時間によって銀ナノワイヤーのアスペクト比は変化し、長さはおおよそ 20 マイクロメートル(直径~55nm)まで伸長させること

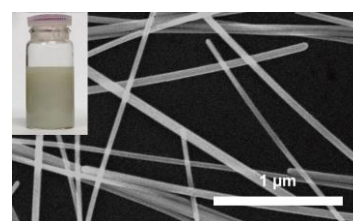


Fig.1 SEM image of silver nanowire.

ができた。溶媒中でのナノワイヤーの分散性を考慮し、実験には Fig.1 に示す、平均長さが 3.5 μ m(平均直径:55nm)の銀ナノワイヤーを利用した。一方で、側鎖にローダミンを有するポリメチルメタクリレート(PMMA)を異なる種類のメタクリレート系モノマー(M)に溶解し、少量の光開始剤(Lucirin TPO)と架橋剤(PEGDMA)を加え、光反応性の高分子混合溶液を設計した。この溶液に 50mg/mL の濃度で銀ナノワイヤーを均一に分散させ、紫外光を照射し、モノマーを重合した。得られたフィルムの内部構造の一例を Fig.2 に示す。Fig.2(a)は蛍光像であり、明部はローダミンがラベルされた PMMA リッチ相を表し、暗部はモノマーM の重合体(PM)リッチ相を表している。図より、フィルムは PMMA リッチ相が孤立した海島構造を形

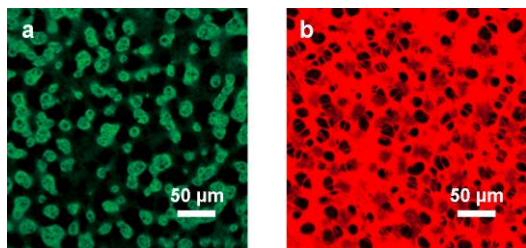


Fig.2 Confocal laser scanning microscope images of a film prepared by UV irradiation with an intensity of 3.0 mW/cm². (a) fluorescence image (b) reflection image.

成していることがわかった。また、Fig.2(b)に銀ナノワイヤーの反射像を示した。これらの2つの像を比較すると、銀ナノワイヤーはPMリッチ相に分布することがわかった。四端子測定法を利用してフィルムの電気伝導率を計測したところ、 1.1×10^{-2} S/cm であった。一方、照射する光の強度を変え、重合キネティクスを変化させると、Fig.3 に示す相分離構造が現れた。Fig.3(a)(b)は Fig.2 と同様の蛍光像と反射像を示しているが、この光強度ではPMMAリッチ相とPMリッチ相が連続的につながった共連続構造を形成することが分かった。また、Fig.3(c)は、Fig.3(a)(b)の矢印線上の強度分布を表しているが、これからも銀ナノワイヤーはPMリッチ相に局在することが分かった。Fig.3(d)(e)は、三次元像を示しており、フィルム内部でそれぞれの相と銀ナノワイヤーは連続的につながった構造を有することが観察された。さらに、フィルムの電気伝導率は、 2.0×10^{-1} S/cm となり、Fig.2 に示す試料よりもおよそ10倍高いことが明らかになった。これらの実験結果から、相分離構造の特徴はフィルムの電気伝導率に大きく影響すると考えられた。その一方で、本研究で検討したPMMAとPMは分子構造が類似しているため、それらを混合したフィルムは、内部に相分離構造を有するものの、光を散乱せず高い透明を有し

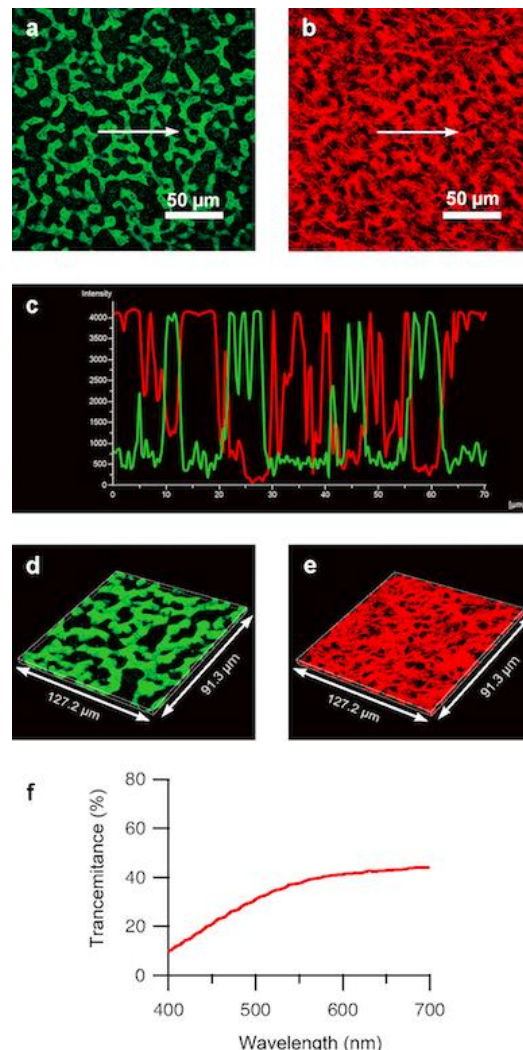


Fig.3 A film prepared by the intensity 5.0 mW/cm².

ている。このようなフィルム自身の特長に起因して、銀ナノワイヤーを添加したフィルムはある程度の光透過性を維持する事を確認した(Fig.3(f))。今後、フィルムの電気伝導率と光透過性を向上させるためには、銀ナノワイヤーの分散性や界面抵抗などの課題を克服する必要がある。

(参考文献)

1. Nakanishi, H., Norisuye, T., Tran-Cong-Miyata, Q. *J. Phys. Chem. Lett.* 4, 3978-3982 (2013).
2. Nakanishi, H., Kikuta, I., Kawabata, Y., Norisuye, T., Tran-Cong-Miyata, Q., Segawa, H. *Adv. Mater. Interf.* 2, 1500354 (2015). FRONT COVER

【17】 発話タイミングの齟齬を修復する音声対話システムに関する研究

研究者 大阪大学産業科学研究所 教授 駒谷 和範

〔研究の概要〕

人間と外観が類似したヒューマノイドやバーチャルエージェントとの音声対話では、人間と同様に素早い応答が望まれる。我々はこれまでに、素早い応答の副作用として生じる不適切な応答タイミングと音声認識誤りの両方を、事後的に修復する手法を提案してきた。本研究ではこの修復の要否判定部分の性能を、ユーザ適応により向上させた。ユーザの話すテンポが個人により異なることに着目し、このテンポに応じて要否判定に用いる発話間隔の閾値を適応させた。具体的には、話すテンポと発話間隔の相関を分析し、対話中に取得可能なテンポに基づき閾値を変更することで、修復要否判定が 6.4 ポイント向上した。

〔研究経過および成果〕

音声対話システムでは“何を話すか”という応答内容の正しさとともに、“いつ話すか”という応答タイミングが重要である。一般的に音声対話システムは、ユーザの発話に対して素早く応答することが望ましい。一方で、音声対話システムで素早い応答を実現しようとする場合、ユーザの発話中にシステムが話し始めることがある。これはシステムが、ユーザ発話中の短い無音区間を発話終了であると誤認定するからである。このときシステム内部では、元来一発話であったユーザ発話が、無音区間により複数の発話区間に分割されている。この現象を発話の誤分割と呼ぶ。

発話の誤分割の修復が必要か否かの判定精度を向上させるため、ユーザのそれまでのふるまいに適応した判定を行う。この判定において、発話断片間の時間間隔に対する閾値は重要なパラメータである。ここではこの閾値をユーザに応じて変化させる。適切な発話間隔の閾値は、ユーザの話すテンポと関係があると考えられる。ここではあるユーザの発話テンポを、システムの発話終了からユーザの発話開始までの時間

間隔の平均とした。システムに対して素早く応答するユーザは、発話中の言い淀みが少なく、発話中のポーズも短いと予想される。このため発話間隔の閾値を短く設定できれば、不要な修復処理やそれに伴う応答の遅延を避けられる。一方で、システムにゆっくりと応答するユーザは、発話中に長いポーズがあることが多い。この場合、発話間隔の閾値を長く設定できれば、発話断片間の間隔が長い場合でも発話断片対を修復できる。

ユーザの発話テンポは、ユーザごとに、対話開始から現在の発話までの発話タイミングの平均として計算する。これをオンライン適応と呼ぶ。これに対し、各ユーザの対話全体における発話テンポを用いる場合をバッチ適応と呼ぶ。バッチ適応は対象ユーザの対話データが全て事前に得られていると仮定した場合であり、理想的な条件に相当する。

ユーザ適応は学習フェーズと実行フェーズの 2 つに分けられる。学習フェーズでは、ユーザ毎の対話データから、適切な発話間隔の閾値と発話テンポの相関を調べ、それらの線形回帰関数を求める。実

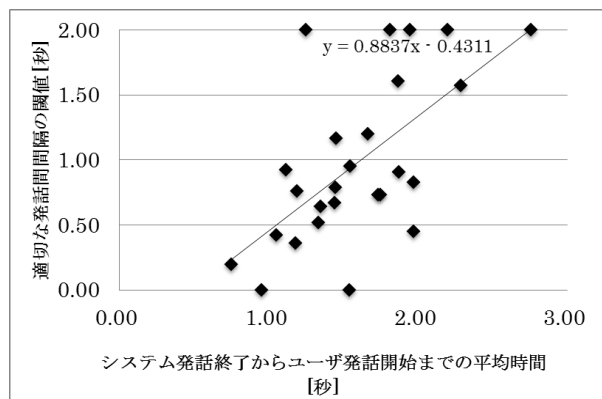


図 1 発話テンポと適切な発話間隔の関係

行フェーズでは、ユーザの一発話を入力とし、それまでの対話履歴から得られる発話テンポと、学習フェーズで得た線形回帰関数を用いて、発話間隔に対する閾値を適応させる。この適応した閾値を用い、修復が必要であるか否かのラベルを出力する。

ユーザの発話テンポと適切な発話間隔の閾値の関係を調査した。これには以前に構築した世界遺産検索システムにより収集された 26 名分のデータを利用した。ここでは発話間隔が近接しており(2.00 秒未満)、雑音ではない(各発話断片が 0.80 秒以上の)発話断片対が 6 対以上あるユーザを調査対象とした。適切な閾値は、データ中の発話断片対を用いて定めた。具体的には、ユーザ毎に、元来一発話か否かを、発話間隔の特徴のみを用いて、SVM により判定した場合の閾値とした。これらの関係をプロットしたものを図 1 に示す。縦軸は適切な発話間隔の閾値[秒]を示し、横軸はシステムの発話終了からユーザの発話開始までの時間間隔の平均[秒]、すなわち発話テンポを示す。このときの相関係数は 0.63 であった。このデータから線形回帰式として、閾値[秒] = $0.884 \times$ 発話テンポ[秒] + 0.431 を得た。この回帰式を用いて、ユーザの発話テンポから、閾値を決定する。

ユーザに適応した閾値を基に、修復要否判定の性能を確認する実験を行った。ここでは入力された発話

断片対の発話間隔が、ユーザに適応した閾値よりも小さい場合は、修復が必要であるとし、大きい場合は不要であると判定する。オンライン適応により閾値のユーザ適応を行った場合は、ベースラインに比べて判定精度が 3.3 ポイント上昇した。またバッチ適応により閾値を決定した場合は、ベースラインに比べて判定精度が 6.4 ポイント上昇した。このことから閾値のユーザ適応による判定精度の向上を確認できた。オンライン適応では、対話の開始時付近での適応が不安定であることから、バッチ適応ほど性能は向上しなかったものの、ベースラインよりも性能が向上することが示された。

[発表論文]

1. 堀田 尚希, 駒谷 和範, 佐藤 理史, 中野 幹生: 音声対話システムにおける発話の誤分割修復要否判定のユーザ適応. 人工知能学会研究会資料, SIG-SLUD-B403-02, pp.6-13, 2015.
2. 堀田 尚希, 駒谷 和範, 佐藤 理史, 中野 幹生: 誤分割された音声発話の修復手法のオンライン実装とユーザ適応. 情報処理学会全国大会, 5P-05, 2015.
3. Kazunori Komatani, Naoki Hotta, Satoshi Sato, Mikio Nakano: User Adaptive Restoration for Incorrectly Segmented Utterances in Spoken Dialogue Systems. 16th Annual SIGDIAL Meeting on Discourse and Dialogue, pp.393-401, 2015.
4. Kazunori Komatani, Naoki Hotta, Satoshi Sato, Mikio Nakano: Posterior Restoration of Turn-Taking and ASR Results for Incorrectly Segmented Utterances. IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E98-D, No.11, pp.1923-1931, 2015.

【18】 共ドープシリコンナノ結晶を単電子島として用いた単電子素子の研究

研究者 神戸大学大学院工学研究科 助教 加納 伸也

〔研究の概要〕

単一電子の静電反発に起因するクーロンブロック効果を用いて動作する単電子素子は、単一素子で再構成可能な論理回路や電流標準器の実現という点で注目されている。申請者は共ドープシリコンナノ結晶を単電子素子に組み込むことで、室温で動作する単電子素子の構築をめざしている。本研究では、金ナノギャップ電極間に共ドープシリコンナノ結晶を吸着させた構造において、室温から 150 K においてクーロンブロック現象に起因した非線形な電流電圧特性が発現することを示した。

〔研究経過および成果〕

電子同士の静電反発力に起因するクーロンブロック現象を用いて動作する単電子素子は、単一素子で再構成可能な論理回路や、電子を一つずつ流すことで高精度に電流を制御する電流標準器といった、新規な機能を有する電子素子の実現できるという点で注目されている。室温で動作する単電子素子の報告はこれまでに複数存在するが、室温安定動作の難しさと素子毎の特性ばらつきの大きさといった課題のため、素子の実用化には至っていないのが現状である。

室温で単電子素子を安定に動作させるためには、素子の付加エネルギー(E_a)を熱エネルギー($k_B T$)よりも十分大きく設計する必要がある。ここで付加エネルギーは、帯電エネルギー(E_c)と離散エネルギー準位間隔(ΔE)の和で表される。一般に金属微粒子の場合は $E_a \sim E_c$ となるために、粒径を 2 nm 以下と十分小さくして、帯電エネルギーを大きくする必要がある。一方粒径が小さくなると、ゲート電極との静電カップリング(ゲート容量 C_g)が小さくなるため、ゲート電圧による微粒子のポテンシャルエネルギーの制御が難しくな

る。このように、単電子素子の動作温度と動作原理の間にはトレードオフが存在している。

ここで、半導体微粒子に着目すると、金属と比較して有効質量が軽く、フェルミ準位近傍の電子密度が低いいため、離散エネルギー準位間隔の大きさを帯電エネルギーと同等程度に設計することが可能となる($\Delta E \sim E_c$)。半導体微粒子が 6 nm 程度の大きさでも、室温の熱エネルギーと比較して、 ΔE を十分に大きく設計ができる。

サイズ制御された半導体微粒子として、ホウ素とリンを同時にドープした共ドープシリコンナノ結晶が、有

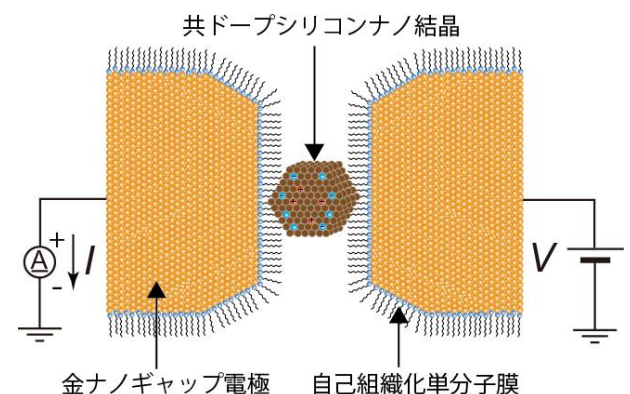


図1 共ドープシリコンナノ結晶を用いた単電子素子の模式図と、測定回路図。

力な候補として挙げられる。このナノ結晶は、表面が高濃度のホウ素とリンのシェルで覆われていることにより、ナノ結晶同士の凝集を防いでいる。そのため、鎖長の長い有機分子に保護された一般的なシリコンナノ結晶とは異なり、表面の分子修飾なしで水やメタノール溶媒中に単分散する。本研究ではこの共ドーピングシリコンナノ結晶を利用することで、電気特性の再現性が良く室温で動作する単電子素子の開発をめざした。

〔実験方法〕 金ナノギャップ電極に、表面分子修飾なしの共ドーピングシリコンナノ結晶を吸着させることで、単電子素子の試作を行った。模式図を図1に示した。

スパッタリング法により形成した Si, P, B, O からなるアモルファス膜を熱処理することにより、共ドーピングシリコンナノ結晶を膜中に成長させた。その後、膜をフッ化水素酸でエッチングすることで、メタノール溶液中にナノ結晶を取り出した。このナノ結晶は、平均の粒子径が 7 nm 程度であり、負のゼータ電位を有することで単一に溶液中に分散している。

金ナノギャップ電極は、電子ビームリソグラフィー法と金属蒸着により、熱酸化膜付 Si ウェハー上に形成した。直径 7 nm 程度のナノ粒子が架橋できるギャップ間隔を有するよう、リソグラフィーを行った。その後、電気測定用のコンタクトパッドをフォトリソグラフィーと金属蒸着により形成した。

単電子素子の形成には、自己組織化プロセスを用いた。金ナノギャップ電極表面に自己組織化単分子膜を形成することで、溶液に浸漬させるだけで自発的に素子を組み上げる。シリコンナノ結晶を自発的に金電極上に吸着させるため、酸溶液中でアミノ基の電離により正に帯電する、6-アミノ-1-ヘキサチオール(同仁化学研究所製)を使用した。

以下にナノ結晶の吸着プロセスを述べる。まず、金ナノギャップ電極を有機溶媒洗浄し、UV オゾン処理を行う。次に、6-アミノ-1-ヘキサチオールのエタノール溶液(濃度 1 mM)に電極を 24 時間浸漬させる。基板を洗浄後、最後に共ドーピングシリコンナノ結晶が分散したメタノール溶液に電極を浸漬させ、シリコンナノ結晶をナノギャップ電極上に吸着させる。作製した素子は、室温・200 K・150 K で、金ナノギャップ電極間の電流電圧測定を行った。

〔実験結果〕 図2に素子の電流電圧特性を示した。測定温度を下げるに従い電気伝導度が低下していき、150 K では明瞭なゼロ電流領域が現れている。室温でも、非線形性を有する電流電圧特性を示していることから、室温付近でもクーロンブロック現象が現れていることが示唆される。上記の温度依存性が存在することから、キャリアが熱アシストを受け離散準位間を移動するホッピング伝導が現れている。

本研究を遂行するにあたりご協力いただいた、東京工業大学応用セラミックス研究所真島豊教授、および本研究助成によりご支援いただいた公益財団法人カシオ科学振興財団に御礼申し上げます。

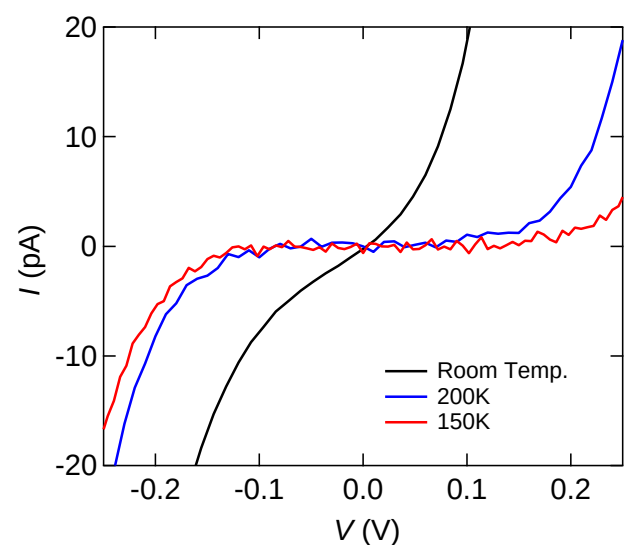


図2 作製した素子の電気伝導特性。

【19】色覚特性者の色彩感覚モデルに基づく自然な画像補正アルゴリズムの提案

香川大学工学部知能機械システム工学科 助教 佐藤 敬子

〔研究の概要〕

カラーユニバーサルデザインの取り組みとして、色覚特性者が色弁別しやすいように画像を再配色するシステムの構築があげられる。既存システムは主に色の弁別性に着目したものであり効果はあるが、色を与えるイメージがどのように伝わっているかは考慮されていない。本課題では、その基礎的研究として色覚特性者の色彩感覚に着目し、色覚特性者がどのように色彩からイメージをとらえているのかを実験とデータ解析により解明する。得られたデータから色覚特性者の色感性モデルを構築し、最終的には画像の再配色システムに導入することで色覚特性者に対しても本来持つ画像のイメージを正しく伝達することを目標とする。

〔研究経過および成果〕

日本人男性の約 5%が、特定の範囲の色について差を感じにくい色覚特性者 (Color Vision Deficient, 以下 CVD と略記) と言われている。通常、一般色覚者 (Normal Trichromat, 以下 NT と略記) は L, M, S 錐体の 3 種類の錐体をもつが、CVD は L もしくは M 錐体の変異によって赤緑の判別がつきにくい、という特性をもっている。本研究では、CVD が持つ色彩に対するイメージ感覚 (色から受ける暖かさ、重さ、美しさ等の様々な印象) を明らかにするため、色彩印象評価実験を行い、解析を行った。CVD の色感覚に着目した研究は少ないのが現状で、さらに、色感覚は色名応答 (赤や緑、といった色名をつける人間の特性) と密接に関わりがあり、先行研究では、CVD が 2 色覚者であっても、NT と同等程度に色名応答をする能力が観測されていることもある。本稿では、CVD 及び NT の 204 色に対する色感覚実験と色名応答実験から得られたデータに対して解析を行った結果について報告する。

実験は香川大学工学部内の暗室で行われた。モニ

タ (校正済 EIZO ColorEdgeCX270) 上に色がランダム呈示され、実験参加者はマウスを操作して応答した。実験刺激は、8, 32, 56cd/m² の各輝度レベル (低, 中, 高輝度) を設定し、均等色空間である u'v' 色度図内で 68 色ずつサンプリングした。色名応答実験では、参加者は画面上に呈示された色に対してあてはまると思う色名を応答した。色名は、基本色 11 色 (白, 黒, 灰, 赤, 緑, 青, 黄, 紫, 橙, 桃, 茶) に “分からない” を含めた 12 カテゴリであった。色感覚実験では、呈示される色から受ける印象について、6 形容詞対 7 件法の SD 法により回答した。印象評価に使用する形容詞対は、色彩印象に関する先行研究 (色感覚は通常、活動性・評価性・力動性という 3 つの概念からなる、とされる) に基づき、軽いー重い, 美しいー汚い, 暖かいー冷たい, 好きー嫌い, 明るいー暗い, 派手なー地味な, を使用した。

色名応答実験の結果、CVD の緑応答範囲は NT に比べて広くなり (先行研究と同様の知見), NT では輝度レベルを通して緑応答範囲は変化しないのに対して、CVD は低輝度レベル (8cd/m²) においてより広く

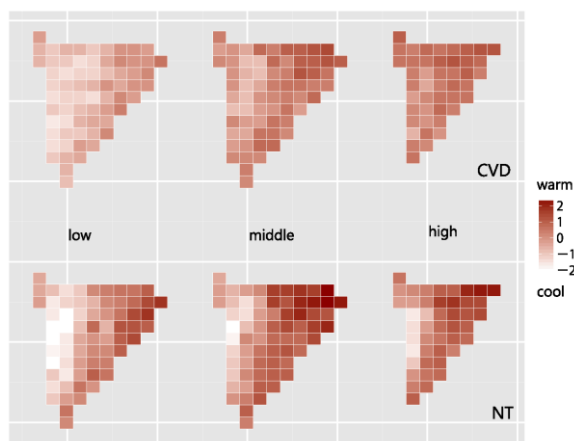


Fig.1 Heat maps of warm-cool ratings

なることが示された。しかし、赤、茶色、ピンク、オレンジといった赤系の色応答については、比較的NTと類似する傾向にあった。次に、色感覚実験の結果に対し、各群で因子分析を行った。その結果、CVDとNTと異なる構造が確認された形容詞は、活動性に含まれる、暖かいー冷たい、派手なー地味な、であり、評価性、力動性に関する形容詞に差異は見られなかった。ここでは“暖かいー冷たい”に対する評価値についてCVD、NT各群の平均値を各輝度レベルでu'v'色度図上に表現したもの(横軸は緑ー赤方向、縦軸は青ー黄方向を表す)をFig.1に示す。CVDの色の暖かさに対する感覚はNTに比べて全ての輝度レベルで低く、特に低輝度レベルでは顕著であった。一般的に色の暖かさは、赤系は暖色、青系は寒色と言われるように、NTでは赤系の色において値が高くなった。興味深いのはCVDが赤系の色に対してNTと近い色名応答をしているにもかかわらず、色感覚では違いが見られたことである。この結果について、人間の色処理メカニズム(赤緑反対色応答の処理はL錐体とM錐体の感度差で決まる)から考察するため、低輝度レベルの色について、色刺激のL-M値と、暖かいー冷たい、の評価値をCVD及びNT別にプロットしたものをFig.2に示す。横軸はL-M値を示しており、

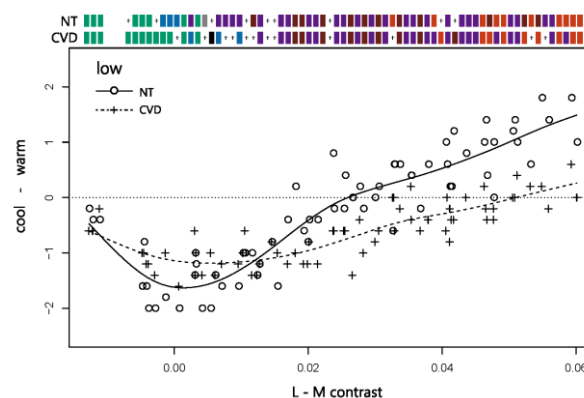


Fig.2 Spline plots describing relationship between warm-cool ratings and L-M values at low luminance

NTでは値が高くなるにつれて色の暖かさが増していることがわかる。一方でCVDは値が増加しても色から受ける暖かさの感覚は上昇していない。予測された通り、これはCVDのL-M値に対する感度が低いことに起因していると考えられる。本研究により、CVDの色感覚についての基礎的研究として、代表的な色感覚である“暖かさ”に特徴があることが示された。しかし、色覚特性者には3種類の型があり、さらにその異常の強度も様々である。今後、基礎データの収集を随時続けていくとともに、型や強度との関連性についても調査していく。

[発表論文]

1. K. Sato, H. Takimoto, and Y. Mitsukura, "Color naming properties and color impression of subjects with deficient color-vision at different brightness levels", Abstract book of the 23rd Symposium of ICVS, p.110, 2015
2. K. Sato, H. Takimoto, and Y. Mitsukura, "Color categorization properties and color sensation on monitor for color-vision deficient subjects and normal trichromat subjects", Proc. of the 2015 IEEE International Conference on SMC, pp.2424-2428, 2015

【20】 フルスペクトル太陽電池用革新的透明導電膜の創製

研究者 佐賀大学大学院工学系研究科 教授 田中 徹

〔研究の概要〕

フルスペクトル太陽電池の高効率化には紫外から赤外までの広い波長範囲を透過できる透明導電膜が必要である。本研究では、元来の物性として高い電子移動度を有することから低電子濃度でも低抵抗率が得られる CdO 系透明導電膜に着目し、ZnO との混晶化によるワイドギャップ化の可能性を探ることを目的に、ZnCdO の分子線エピタキシー法による成長を行った。成長温度、Cd フラックス比など成長条件を追究することによって、幅広い Cd 組成範囲の ZnCdO 薄膜を得ることに成功し、その基礎物性を明らかにすることができた。

〔研究経過および成果〕

近年、地球環境問題の深刻化に伴って、太陽光発電に大きな期待が寄せられている。太陽光発電の更なる低コスト化のためには、紫外から赤外にわたる太陽光スペクトルを効率よく電気エネルギーに変換できる超高効率太陽電池の開発が必要である。バンドギャップの異なる複数の半導体 pn 接合を積層した多接合太陽電池は、広い波長範囲にわたって太陽光を無駄なく吸収できることから、既に III-V 族化合物を用いた 3 接合太陽電池において 40%を超える非常に高い変換効率が報告されている。また、Si や CuInSe₂ 系薄膜太陽電池と他の材料を組み合わせた多接合太陽電池も提案され、盛んに研究が行われている。

このようなフルスペクトル太陽電池の高効率化のためには、紫外から赤外までの広い波長範囲の光を透過できる透明導電膜が不可欠である。しかし、現在頻繁に使用されている In₂O₃:Sn (ITO)、In₂O₃:Ga(IGO)、ZnO:Al(AZO)は近紫外・可視領域においては高い透過率を有するが、赤外の領域では透過率が極端に低下するため、使用することができない。

CdO はバンドギャップが約 2.3eV であり若干小さい

が、元来の物性として高い電子移動度を有するので、低電子濃度でも低抵抗率が得られるという特徴がある。ZnO との混晶化によってワイドギャップ化が可能と考えられることから、本研究では Zn_{1-x}Cd_xO(ZnCdO)混晶に着目し、まず分子線エピタキシー (MBE)法による成長特性の把握を目的として、サファイア (α-Al₂O₃) 基板上に ZnCdO 薄膜の成長を行った。

MBE 成長の原料として、Zn、Cd は各固体ソースのクヌーセンセルを用いて供給し、O は RF プラズマ銃を用いて、O ラジカルとして供給した。本実験では、まず Cd と Zn の供給フラックス比 ($f_{Cd}=[Cd]/([Zn]+[Cd])$ 、以下、Cd フラックス比)を 0.9 一定とし、基板温度を 100～300℃の範囲で変化させ、成長を行った。その後、基板温度 250℃一定の下で、Cd フラックス比を 0～1 の範囲で変化させ、成長を行った。O ラジカルの供給量は全ての実験を通して一定とした。作製した薄膜の評価には、X 線回折 (XRD)、電子プローブ微小分析 (EPMA)を用いた。

図 1 に Cd フラックス比 $f_{Cd}=0.9$ 一定の下で成長した ZnCdO 薄膜の XRD プロファイルを示す。ZnO はワルツ鉱構造、CdO は岩塩構造を有しており、Cd 組成

によって異なる結晶構造が現れることが報告されている。図中に CdO 111 面、および ZnO 0002 面の回折角度を点線で示している。基板温度 100~200℃で成長した薄膜では、31.8°、34.8°、38.3° 付近に Cd からの回折ピークが見られた。これらの薄膜では表面が黒くなっていたことから、基板温度が低いため、O との反応が十分起こらず、Cd が単体として析出したものと考えられる。一方、250℃で成長した薄膜では ZnCdO からの非常に強い回折ピークが検出された。しかし、300℃の場合は、回折ピークは ZnO と一致しており、Cd はほとんど取り込まれていないことが分かる。以上のことから、ZnCdO の成長は基板温度に大きく依存しており、今回の成長条件下では 250℃が最適であることが分かった。

次に、基板温度 250℃一定の下、Cd フラックス比 f_{Cd} を 0~1 の範囲で変化させて成長を行った。しかし、Cd フラックス比 $f_{Cd}=0.85$ 以下は、Cd は全く薄膜中に取り込まれず、ZnO が形成されることが分かった。図2

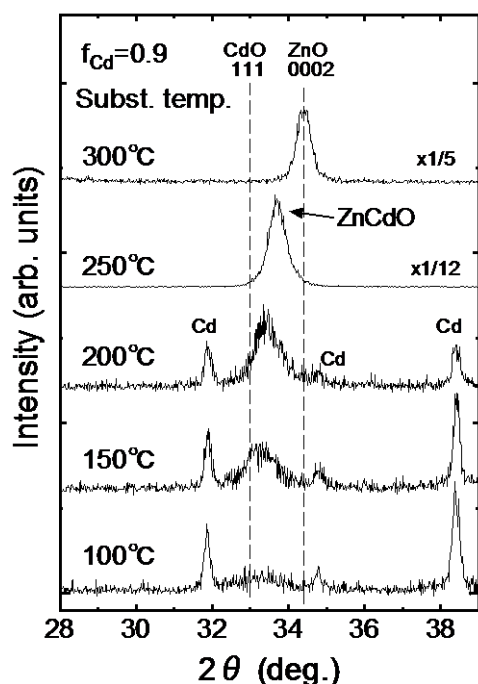


図1 異なる基板温度で成長した ZnCdO の X 線回折プロファイル

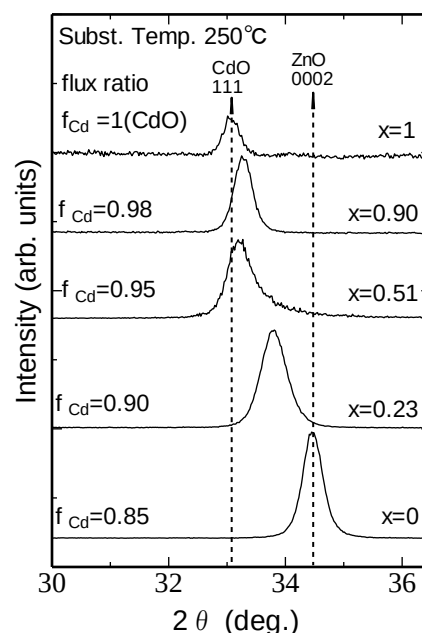


図2 Cd フラックス比を変えて成長した ZnCdO の X 線回折プロファイル。

に $f_{Cd}=0.85\sim 1$ で成長した薄膜の XRD プロファイルを示す。 $f_{Cd}=0.90$ 以上において、回折ピークのシフトが見られ、ZnCdO 混晶が成長していることが分かる。EPMA により求めた Cd 組成 x を図中に示しているが、フラックス比 f_{Cd} の制御により Cd 組成を幅広く変化できていることが分かる。得られた薄膜について光学特性の評価を行うことで、ZnCdO の基礎物性を明らかにすることができた。

[発表論文]

1. 潮 昇平, 田中 徹, 齊藤勝彦, 西尾光弘, 郭 其新, 分子線エピタキシー法による ZnCdO 薄膜の作製と評価, 平成 27 年度(第 68 回)電気・情報関係学会九州支部連合大会, 福岡大学, 平成 27(2015)年 9 月 27 日, 05-2P-04.
2. 潮 昇平, 寺沢 俊貴, 岡野 友紀, 田中 徹, 齊藤 勝彦, 郭 其新, 西尾 光弘, 分子線エピタキシー法による ZnCdO 薄膜の成長と評価, 2016 年第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 平成 28 年 3 月 21 日, 21a-H113-5.

【21】ブラックホール直接撮像のための気球 VLBI 搭載高速データ記録装置の開発

代表研究者 総合研究大学院大学 物理科学研究科 宇宙科学専攻 助教 土居 明広

共同研究者 総合研究大学院大学 物理科学研究科 天文科学専攻 助教 河野 裕介

共同研究者 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 第二研究ユニット 開発員 馬場 満久

共同研究者 国立天文台 水沢 VLBI 観測所 特任専門員 小山 友明

共同研究者 総合研究大学院大学 物理科学研究科 宇宙科学専攻 博士課程 中原 聡美

〔研究の概要〕

ブラックホール直接撮像をおこなうミッションの技術検証のために、気球搭載型の超長基線電波干渉計 (Very Long Baseline Interferometry: VLBI) 望遠鏡を製作しており、そのキー技術である「搭載用高速データ記録装置」の開発研究をおこなった。この 8 Gbps データ記録装置は、高発熱機器であり、飛翔体搭載型としては例のないものである。成層圏の、対流が非効率となる低真空環境と、マイナス 50 度という低温度環境のせいで、排熱と保温のジレンマの中での熱設計となる。我々は、コストを抑えるために地上動作部品で構成される装置を省電力化し 1 気圧封入した気密容器の中に入れ、さらに気密容器内を排熱区画と保温区画に分け、その間をファンによる空冷でアクティブに熱交換するコンセプトで安定的な温度環境を実現させた。真空低温槽の中での動作試験にてその性能を確認した。本装置は、平成 28 年夏季の気球実験にて、実際に使用される予定である。

〔研究経過および成果〕

本研究において開発した VLBI 高速データ記録装置は、成層圏の環境にて 8 Gbps のレートでデータ書き込みをおこなう装置である。これは、世界で初めてとなるブラックホール直接撮像をおこなうミッションの技術検証のために製作中の、気球搭載型の VLBI 電波望遠鏡に搭載されるキーコンポーネントとなる予定である。この研究期間中に、平成 28 年夏季の気球実験の実施予定が決定した(平成 28 年 2 月現在)。本研究で開発された VLBI 高速データ記録装置は実際の成層圏環境での実験に実戦投入される機会を得ることになる(図 1)。

飛翔体に搭載される望遠鏡は、質量制約のせいで、その口径は限定され、望遠鏡感度の制限となる。しか

し、データの高い記録レートは、その感度不足を補うことができるため、飛翔体望遠鏡における搭載用高速データ記録装置の重要性は非常に高い。高い記録レートは、高い消費電力と引き換えに得られる。そのため、観測前には電源を落として待機しバッテリー

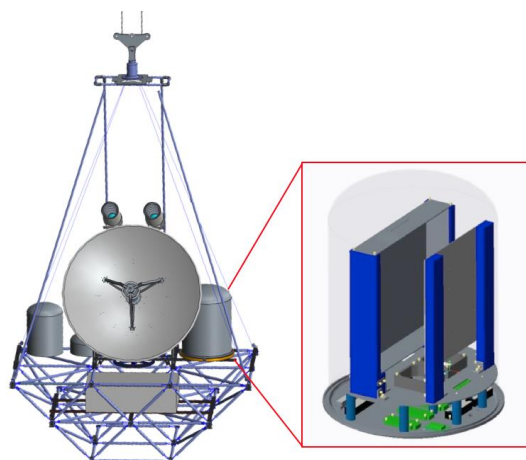


図 1: 気球 VLBI ギンドラシステムと高速データ記録装置を含む気密容器システム

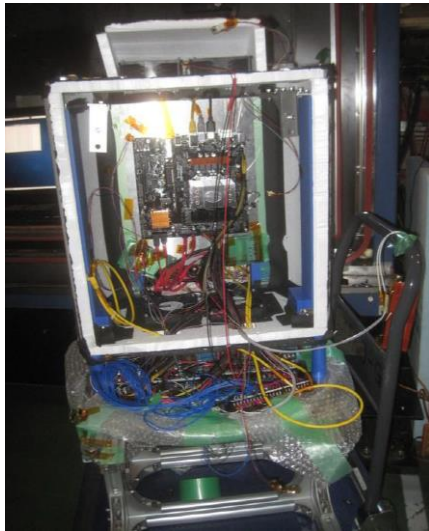


図 2: 製作した気密容器封入型 VLBI データ記録システムの写真。撮影のため、容器外壁を取り除いた。

の消耗を抑え、観測時における運転時には高い排熱レートを確保する仕組みが必要である。ところが、成層圏の気温は低いため（気温 $-50 \sim -40^{\circ}\text{C}$ ；高度 20–30 km）待機時には保温する必要がある一方で、成層圏の気圧は低く（気圧 ~ 10 hPa）対流冷却が非効率なため、十分な排熱経路を確保する必要がある。この排熱と保温のジレンマの中で、当初のパッシブな熱設計（数値解析）は成立しなかった。

そこで我々は、記録装置全体を1気圧封入の気密容器の中に入れ、容器内を排熱区画と保温区画に分け（記録装置は保温区画に設置する）、その間を制御可能なファンによってアクティブに熱交換するコンセプトで熱設計（数値解析）をおこない、成立解を得た。1気圧の室温環境を手に入れたことで、データ記録装置には地上動作部品が利用できるようになり、コストを大幅に削減できるようになった。また、当初見込んでいた 500 Watt もの消費電力は、省電力化の開発をおこなうことで 200 Watt にまで削減でき、熱設計に余裕が生まれた。我々は、国立天文台水沢 VLBI 観測所が開発中の VSREC を改良することで実機を製作し（図 2 写真）、成層圏の気圧温度環境を

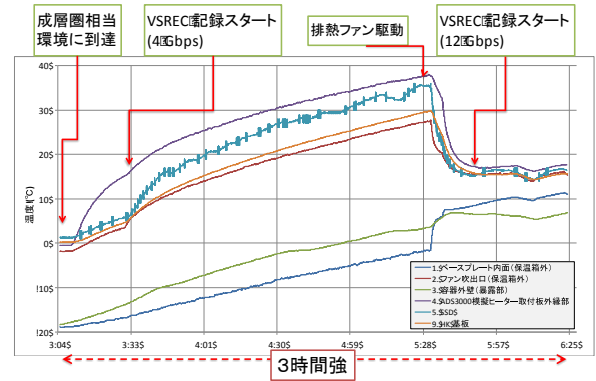


図 3: 低温真空槽の中での連続動作試験における装置各所の温度プロファイル結果。

模擬できる真空冷却槽（JAXA 宇宙科学研究所）の中で、動作検証実験をおこなった。 -50°C の環境の中で、約 0°C の保温区画に入った記録装置は数時間以上待機できることを確認した。記録装置を動作させると 200 Watt の熱は保温区画の温度を上昇させたが、ファンをアクティブに制御し、暖気を排気し、排熱区画の冷気を吸気することで、保温区画の気温を $+15^{\circ}\text{C}$ 付近に安定化することができた（図 3）。排熱区画に出された熱は、気密容器外壁の大面积を活かして順調に排熱された。このように、開発した VLBI 高速データ記録装置は、地上での熱環境試験に見事にパスし、熱設計のコンセプトを検証することができた。

本研究は、第32回カシオ科学振興財団研究助成を受けおこなわれました。

〔発表論文〕

1. 河野裕介, 他, “気球 VLBI 地上試験,” 第 14 回 IVS 技術開発センターシンポジウム (2015).
2. 土居明広, 他, “気球 VLBI ミッションの検討 V,” 日本天文学会秋季年会, (2015), V116c.
3. 土居明広, 他, “気球 VLBI ミッション,” ISAS 大気球シンポジウム, (2015), SA6000044037.
4. 河野裕介, 他, “気球 VLBI 地上試験,” ISAS 大気球シンポジウム, (2015), SA6000044038.

【22】 浮体式洋上風車の動揺抑制を実現する高性能制御

代表研究者 大阪府立大学大学院工学研究科 准教授 原 尚之

共同研究者 大阪府立大学大学院工学研究科 准教授 二瓶 泰範

〔研究の概要〕

本課題の目的は、スパー型の洋上風車に対する浮体の動揺抑制を実現する高性能制御である。このような目的を達成するため、モデル予測制御法および H^∞ 予見制御法の二つの設計法を利用したブレードピッチ角制御系を構成し、その性能の評価を空力弾性シミュレータ FAST においておこなった。また、モデルベースの設計手法の有用性を実験的に評価するため、大型水槽においてスパー型浮体をもつ浮体式洋上風車に対し H^∞ 制御によりブレードピッチ角制御器を構成し、その性能評価をおこなった。

〔研究経過および成果〕

近年、再生可能エネルギーのひとつである洋上風力を用いた洋上風力発電が着目されている。洋上風力発電には、陸上に比べ発電に適した強く安定した風が利用できる、風車の大型化が図れるなどの利点がある。この洋上風力発電は、基礎を海底に固定する着床式と、基礎を用いず浮体の上に風車を設置する浮体式がある。日本近海は、遠浅の海域が少ないため、浮体式の洋上風力発電の利用が有望視されている。しかしながら、浮体式洋上風力発電では、浮体の上に風車が設置されるため、風波により浮体が動揺してしまうという問題点があった。

本課題では、システム制御工学分野の制御系設計法であるモデル予測制御法と H^∞ 予見制御法を利用することにより、動揺抑制を図る制御系の構成に取り組んだ。これらの制御系設計法は、制御対象のモデルに基づき制御器を設計するモデルベースの設計法である。そこで、モデルベースの制御器設計の有用性を評価するため、スパー型浮体をもつ浮体式洋上風車のスケール模型に対し、 H^∞ 制御によりブ

レードピッチ角制御器を設計し、その有用性を水槽試験において評価した。

モデル予測制御による動揺抑制を図る制御系設計はつぎのような手順でおこなった：

- 1) 設計用モデルの準備:NREL(National Renewable Energy Laboratory)が無料で公開している空力弾性シミュレータ FAST(Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence)を利用し、線形モデルを作成した。動作点は、定格以上の風速領域を想定し、風速 18m/s のときのものを選んだ。また、自由度は浮体のピッチ角、ロール角などを含む8自由度とした(線形モデルの次元はそれらの1階微分を含む16次元)。
- 2) モデル予測制御の設計:上記1)のモデルを離散化した離散時間線形モデルを用い、2次形式の評価関数を用いた線形モデル予測制御の設計をおこなった。システムは16次元のため、重みの選定には自由度があるが、浮体ピッチ角の動揺と発電機速度の定格値からの動揺を抑制するためそれらに対応する変数に対し、大きな重みの

値を用いた。

上記のようにして設計したモデル予測制御を用い、風速情報の予見による動揺抑制の性能をFASTの非線形シミュレーションにより評価した。その結果、緩やかではあるが風速の予見時間を延ばすにつれて浮体ピッチ角の動揺および発電機速度の変動の抑制性能を向上できることが確認できた。

またより実装が容易なPI制御による性能改善の可能性をさぐるため、FRIT法を用いたゲインチューニング法についても検討をおこなった。

ロバスト性を確保したうえで風速の予見による性能改善を目指すための予備研究として、 H^∞ 予見制御を利用した制御系設計についても検討をおこなった。設計用のノミナルプラントは、FASTの線形モデル作成機能を利用して作成した。そして、外乱を風速、評価出力を浮体ピッチ角およびロータ速度に重みづけた信号とし、一般化プラントを作成した。この一般化プラントに対し、 H^∞ 予見制御器を設計し、予見時間と性能改善の度合いを調べた。その結果、外乱-評価出力の間の H^∞ ノルムには、風速の予見効果による改善は観察されなかったが、 H_2 ノルムの意味では改善されることが確認できた。

モデル予測制御および H^∞ 予見制御は、制御対象の数理モデルを用いたモデルベースの制御系設計法である。これらによる性能改善の度合いはシミュレータFASTにより数値的に検証したが、その有用性は実験的にも評価をおこなう必要がある。その準備として、モデルベースの制御系設計法である H^∞ 制御を用い、スパー型浮体をもつ浮体式風車のスケール模型のブレードピッチ角制御をおこない、その性能を大型水槽において評価した。制御系設計に用いる数理モデルはシステム同定法により求め、そのモデル

に基づき、 H^∞ 制御器の設計をおこなった。そして、設計した制御器の性能を、標準的なPI制御器の性能と比較した。その結果、変動風・波なしの条件においては、PI制御器に比べ浮体ピッチ角の動揺抑制およびロータ回転角の変動の抑制性能の向上が確認できた。

〔発表論文〕

1. 柿田, 原, 小西: FRIT法によるPI制御ゲインチューニングの浮体式洋上風車への応用, 第59回システム制御情報学会研究発表講演会, 116-3, 2015
2. S. Tsujimoto, N. Hara, Y. Nihei, K. Iijima, and K. Konishi: Model-based design of a blade pitch controller for a floating offshore wind turbine, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, vol. 20, pp. 13-16, 2015
3. S. Tsujimoto, N. Hara, and K. Konishi: Pitch angle control of floating offshore wind turbines by H^∞ preview control, Proc. of SICE Annual Conference 2015, pp. 931-934, 2015
4. S. Dessort, S. Tsujimoto, N. Hara, and K. Konishi: Blade pitch angle control for floating offshore wind turbines by model predictive control, 電気学会論文誌C, vol. 135, no. 7, pp. 882-892, 2015
5. N. Hara, S. Tsujimoto, Y. Nihei, K. Iijima, and K. Konishi: Experimental validation of model-based blade pitch controller design for floating wind turbines: system identification approach, Wind Energy (投稿中)

【23】 強誘電体ドメイン壁の特異性を利用したナノデバイスの創出

研究者 兵庫県立大学工学部 助教 中嶋 誠二

兵庫県立大学工学部 准教授 藤沢 浩訓

兵庫県立大学工学部 教授 清水 勝

〔研究の概要〕

近年、この強誘電性ドメイン壁(DW : Domain Wall)が光起電力効果や電気伝導性といった特異な物性を示すことが(BiFeO₃:BFO) 薄膜で見出され、これらを用いたデバイス創成が注目を集めている。しかしながら、今のところドメイン構造の制御はある程度可能であるものの、DWの任意位置への形成は難しい。そこで本研究では異なる結晶方位の基板を貼り合わせたバイクリスタル基板上に BFO 薄膜を形成することで、バイクリスタル接合界面において人工的にDWの形成を行った。圧電応答顕微鏡像から、バイクリスタル基板接合面上で帯電109° DWが形成されていることが確認できた。また、透過電子顕微鏡像から理想的なDWとなっていないことが判明したものの、電流マッピング測定によりその DW 上で非線形誘電率が変調されていることを示唆する結果が得られた。

〔研究経過および成果〕

本研究では強誘電体として菱面体晶構造を有する BiFeO₃(BFO)薄膜を、RFマグネトロンスパッタ法を用いて作製した。我々は既に<110>方向に4° 微傾斜した SrTiO₃(STO)(001)基板上に単結晶薄膜を作製することに成功している。この技術を用い、図1に示すように前述の微傾斜 STO 基板2枚の<110>方向が互いに向かい合わせになるように接合したバイクリスタル基板上にBFO薄膜の作製を試みた。接合した両基板上に単結晶BFO薄膜が作製できれば、バイクリスタル接合界面では、図2に示すように自発分極ベクトル P_s が互いに向き合い、帯電した 109° DWが形成

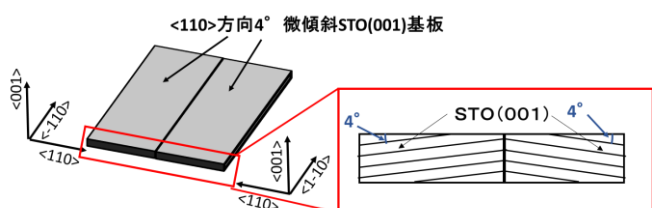


図 1. バイクリスタル基板の概略図

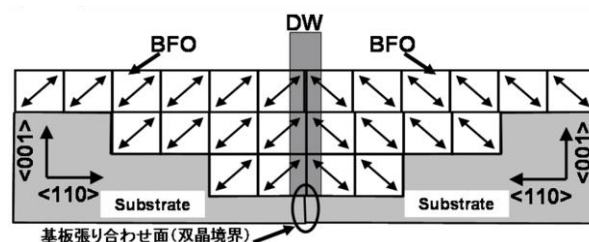


図 2. バイクリスタル接合面上に形成される DW

される。この DW は分極反転することにより帯電する電荷の符号が反転することから、DW におけるエネルギーバンドが変調され、スイッチング動作が期待できる。膜厚 300 nm の BFO 薄膜の作製は基板温度 650℃、スパッタ圧力 0.5 Pa、Ar:O₂ 流量比 7:3、RF 電力 50 W にて行った。ターゲットは Bi₂O₃ と α -Fe₂O₃ の混合粉末を仮焼し、4 inchφ にプレスしたものを用いた。バイクリスタル接合面の両側における BFO (223) 近傍の逆格子空間マッピングを図 3(a)および(b)に示す。これによれば、片方では BFO(-2-23)面の回折ピークのみが、一方では BFO(223)面の回折ピークのみが観察されたことから、図 3(c)に示すようにバイクリス

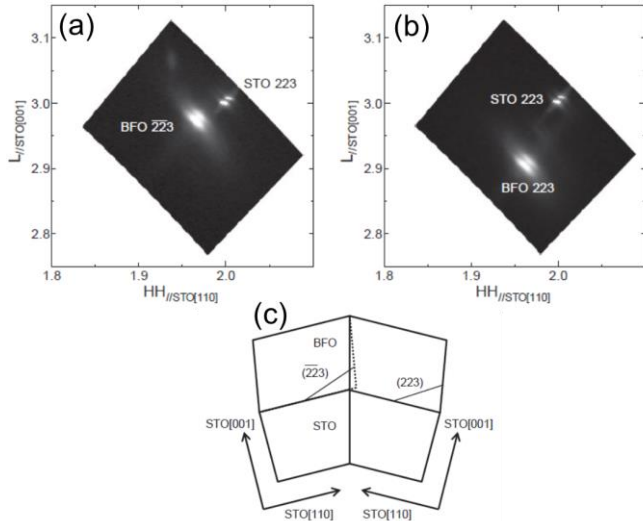


図 3. バイクリスタル接合面の(a)左側、(b)右側における BFO(223)回折点近傍の逆格子空間マッピング、またそこから導かれる(c) バイクリスタル接合面での BFO 結晶格子の配置

タル境界面を境に BFO の結晶が面内方向に 180° 回転していることがわかる。さらに原子間力顕微鏡 (AFM : Atomic Force Microscope) および圧電応答顕微鏡 (PFM : Piezoresponse Force Microscope) を用いた 表面形状像、面内および面外圧電応答像を図 4 に示す。これらの結果から、バイクリスタル接合面では P_s ベクトルが互い向き合う正に帯電した 109°

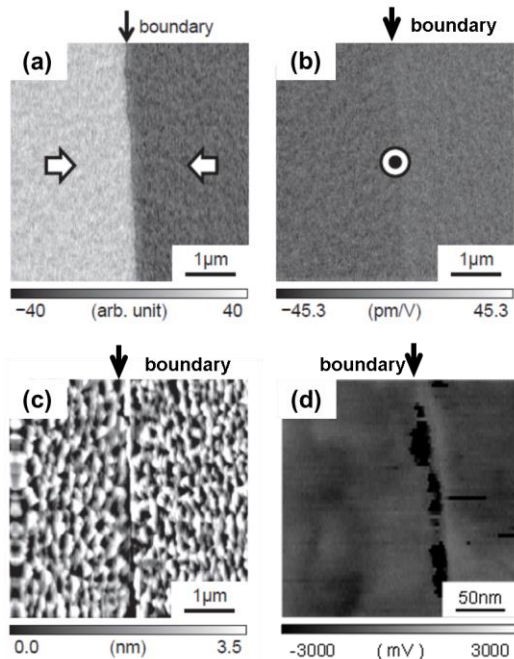


図 4. バイクリスタル接合面近傍の(a)面内および(b)面外 PFM 像と(c)表面 AFM 像および(d)非線形誘電率像

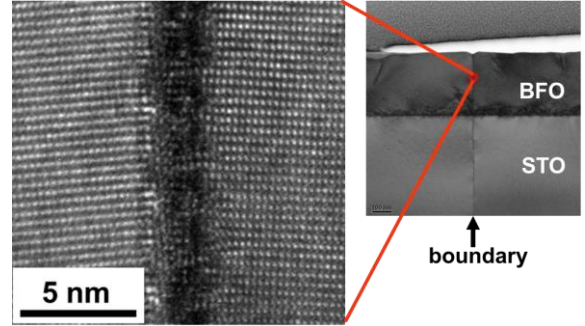


図 5. バイクリスタル接合面上における BFO 薄膜の断面 TEM 像

DW が形成できていることがわかる。さらにこの接合面近傍の非線形誘電率像を観察したところ、DW で非線形誘電率が変調される傾向が確認できたが、導電性の変調は確認できなかった。(図 4(d))。さらに詳しく調べるために透過電子顕微鏡 (TEM : Transmission Electron Microscope) により観察した断面格子像を図 5 に示す。これによれば、バイクリスタル接合面上では理想的な DW にはなっておらず、欠陥や転移が多数存在することが明らかになり、これが導電性変調を確認できなかった原因であると考えられる。

以上のように、本研究ではバイクリスタル接合界面を用いることで人工的に DW を形成することに成功し、非線形誘電率が変調されていることが確認できた。しかし、欠陥や転移が多数存在することから導電性の返答は確認できておらず、今後は理想的な DW を任意位置に形成する取り組みを行う。

〔発表論文〕

1. H. Fujisawa, S. Seto, S. Nakashima, and M. Shimizu, Jpn. J. Appl. Phys., 54, 10NA06 (2015).
2. S. Nakashima, K. Takayama, T. Uchida, H. Fujisawa, and M. Shimizu, Jpn. J. Appl. Phys, 54, 10NA16 (2015).
3. S. Nakashima, T. Uchida, K. Takayama, H. Fujisawa, and M. Shimizu, J. Kor. Phys. Soc., 66, 1389 (2015).

【24】 インパルスプラズマ・テラヘルツ過渡吸収分光法による

グラフェンの超高速ダイナミクスの解明

研究者 立命館大学理工学部 助教 寺本 高啓

〔研究の概要〕

グラフェンは従来物質にない特異的なバンド構造やそれに伴う高速のキャリア輸送特性から物性科学研究の対象として盛んに研究されている。それに加えてキャリア輸送特性や光透過特性から次世代の高速トランジスタやディスプレイ材料として産業的にも応用が期待されている。本研究では超短パルスレーザーにより誘起されるグラフェンの超高速光学応答の解明・制御を行うために、(1)テラヘルツ時間領域分光、(2)ダブルロックインアンプシステムを用いたテラヘルツ時間領域過渡分光法の開発、(3)可視超短パルス光源の開発、(4)2次元電子振動分光法の開発を行った。

〔研究経過および成果〕

①「光伝導アンテナを用いたCVDグラフェンのテラヘルツ時間領域分光」

CVD グラフェンは比較的大量生産に適したグラフェンの生成方法であり、電子部材などの市販用途に適している。近年グラフェンはテラヘルツ用素子としても着目されている。そのため本研究では単層、2層、3層構造のCVDグラフェンのテラヘルツ領域における特性評価を行った。

フェムト秒発振器(800nm, 11fs, 400mW, 80MHz)の出力光を光伝導アンテナ(G10620、浜松ホトニクス)に照射し、テラヘルツの発生および検出を行うテラヘルツ時間領域分光システムを構築した。本システムを用いて計測した結果を図1に示す。テラヘルツ帯におけるCVDグラフェンの吸収スペクトルは、単層、2層、3層と層数が増える毎に吸光度が増え、その相関係数が0.7であることがわかった。

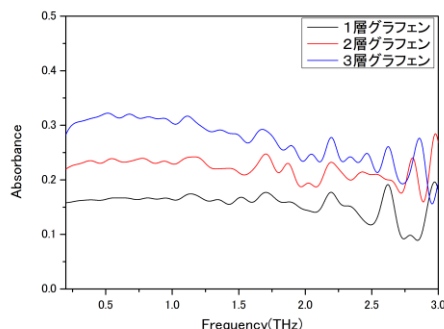


図1. CVDグラフェンのテラヘルツ吸収スペクトル

②「ダブルロックインアンプシステムを用いたテラヘルツ時間領域過渡分光法の開発」

①のテラヘルツ時間領域分光法では、繰り返し周波数数 kHz 程度のテラヘルツ光を用いた。発生したテラヘルツ波は検出素子(光伝導アンテナ)を用いて検出され、それをロックイン検波する。一方で過渡分光実験ではポンプ光照射の有無によるプローブ光の強度変化を測定する。通常その強度変化は 10^{-6} ~ 10^{-3} 程度と微弱であるため、ロックイン検波する。

テラヘルツ時間領域過渡分光を行うためには、パルスのテラヘルツ発生およびポンプ光の有無を同時に実現する必要がある。本研究ではタンデムダブルロックイン検波法を用いて2つの変調成分のみを抽出することを試みた。タンデムダブルロックイン検波法はロックイン検波を2度行う手法で、まず1つ目の参照周波数でロックイン検波を行う。そしてその出力を2つ目の参照周波数でさらにロックイン検波する。本システムの原理検証のため、テラヘルツ波の発生および検出の両方を変調し、その2つの変調成分に由来する信号のみを抽出するシステムを構築した。具体的にはテラヘルツ波発生用の光伝導アンテナに1kHzの交流電圧(10V_{p-p})を印加し、テラヘルツ検出

用のフェムト秒パルスに光チョッパーで 20Hz の光強度変調を行った。本計測システムで観測した結果は①で観測したテラヘルツスペクトルを再現した。これはダブルロックイン検波が成功したことを示す。本システムを用いてテラヘルツ時間領域過渡分光システムを構築する。

③「可視超短パルスレーザーの開発」

波長 600nm の赤色の光は1周期あたり 2fs の電磁波である。近年は1パルスに光が数周期分しか含まれないような非常に短いパルス幅のレーザーが開発されている。本研究では非同軸光パラメトリック発振(Non-collinear Optical Parametric Amplifier:NOPA)を用いて、可視超短パルスの発生を行った。フェムト秒増幅器(800nm,90fs,0.8W,1kHz)から出力される800nm 光を2つに分岐し、1つはシード光発生用、もう1つはポンプ用として利用する。800nm 光をYAG結晶に集光させることにより白色シード光の発生を行った。ポンプ光としては 800nm の2倍波発生(400nm)を用いた。これら2つのパルス光をBBO結晶に非同軸で導入しパラメトリック増幅を行った。発生したNOPA光はチャープミラー対およびプリズム対を用いてパルス圧縮を行い、最終的にパルス幅 4.6fs の超短パルスを発生することに成功した。今後本光源とテラヘルツ光源およびダブルロックイン検波法を用いて超高速分光システムの構築を行う。また次に述べる多次元分光へと拡張する計画である。

④「2次元電子振動分光法の開発」

近年、多次元分光法と呼ばれる過渡分光法が開発され、物質の過渡応答のポンプ・プローブ両方の波長依存性が調べられている。これにより複数の電

子状態間の相関など複雑なプロセスが明らかとなってきた。

本研究で提案する2次元電子振動分光法は多次元分光法の1種であり、ポンプ光として電子遷移を引き起こす可視超短パルスを用い、プローブ光として赤外光を用いて分子(格子)振動をモニタする手法である。これにより電子遷移に伴う電子と分子(格子)振動の相関を直接調べることができる。

本研究は米国カリフォルニア州立大学バークレー校 Graham Fleming 教授の研究室において行った。可視ポンプパルス対(中心波長 550nm、パルス幅 20fs)および赤外プローブ光(中心波長 $7\mu\text{m}$ 、パルス幅 80fs)を用いて、ソルバトクロミック分子(Betaine30)の2次元電子振動分光を行った。2次元電子振動スペクトルを図2に示す。グラフェンにおいても光励起に伴う電子・格子の相関を直接観測する可能性を示唆している。

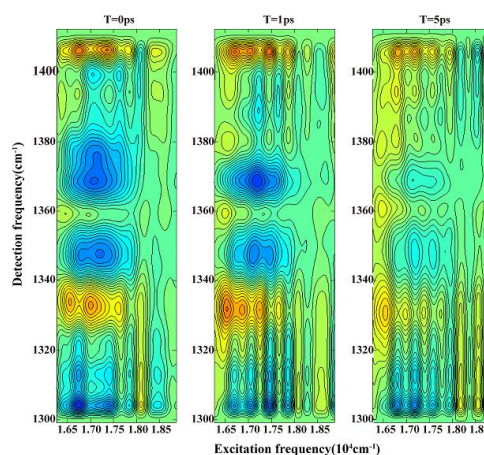


図 2. Betaine30 分子の二次元電子振動スペクトル

[発表論文]

1. 寺本高啓, Thomas Oliver, Nicholas Lewis, Hui Dong, 石崎章仁, Graham Fleming, ”2次元電子—振動分光法による Betaine30 の超高速ダイナミクスの解明”, 第9回分子科学討論会予稿集

【25】 単孔式内視鏡下手術支援ローカル操作型フレキシブル術具マニピュレータ

研究者 大阪工業大学工学部 准教授 河合 俊和

信州大学繊維学部 教授 西川 敦

国立がん研究センター東病院 医員 西澤 祐吏

京都大学再生医科学研究所 准教授 中村 達雄

〔研究の概要〕

単孔式内視鏡下手術で医師と共存協調して臓器に張力をかけ作業空間をつくる第三の手としてのローカル操作型鉗子マニピュレータについて、広い視野と作業範囲でマニピュレータを動作するには術具動作のピボット点を刺入点から離す必要があることから、長軸形状を2自由度でクランク状にパッシブ屈曲させて初期位置決めを行い、アクティブ屈曲する5自由度の鉗子機構を備える、ワイヤ駆動式フレキシブル術具マニピュレータを開発して、臨床医による操作実験を行い有用性と課題を明らかにした。

〔研究経過および成果〕

1. 目的

複数の術具を臍など一カ所から刺入する単孔式内視鏡下手術が行われている。整容性に優れる一方で、術具同士が干渉する狭い視野と作業範囲で手術を行う必要があることから、緊急時に対応しやすい患者傍で、医師と共存協調して臓器に張力をかけて作業空間をつくるローカル操作型鉗子マニピュレータの研究を進めている。

広い視野と作業範囲でマニピュレータを動作するには、術具動作のピボット点を刺入点から離す必要がある。そこで、術具を長軸形状から2自由度でクランク形状にパッシブに屈曲する初期位置決め機構を考えた。また、マニピュレータの先端で臓器を把持牽引するためには、5自由度でアクティブに屈曲する鉗子機構が必要となる。本研究では、図1に示すように単孔式内視鏡下手術において第三の手としての役割を担う、ワイヤ駆動式のパッシブ初期位置決めク

ランクおよびアクティブ鉗子を有するローカル操作型のフレキシブル術具マニピュレータを開発した。

2. マニピュレータ機構

設計試作した本マニピュレータは外径10mmで、位置決めクランクの屈曲は手動にて、鉗子の操作はモータにてワイヤ牽引する駆動方式とした。位置決めクランクの2軸機構は、超弾性の線ばねを通した階段状の円筒3つ2組で構成し、屈曲角90度、クランク距離40mm、先端までの距離160mmとした。鉗子の5軸機構は、シリコーンゴムで構成する屈曲角18度のpitch軸とyaw軸、多段パイプで構成する駆動距離

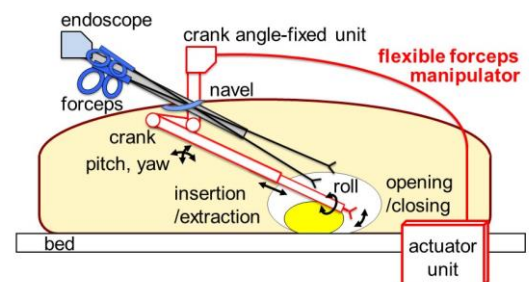


図1 フレキシブル術具マニピュレータの構想

36mm の insertion/extraction 軸、回転角 90 度の roll 軸、外径 3mm の従来鉗子を装着した開閉角 75 度の opening/closing 軸とした。クランク駆動ワイヤは角度固定ユニットに、鉗子駆動ワイヤはクランク機構の内部を通りケーブルチューブを介してモータ駆動ユニットに接続した。図 2(a)に示すマニピュレータ試作機構は重量 0.4kg、図 2(b)に示す鉗子駆動用モータユニットは寸法 445×192×95mm、重量 6.0kg となった。

3. 評価実験と考察

試作マニピュレータを評価するため、動作軌跡と作用力の計測実験、臨床医が操作する本マニピュレータと従来鉗子との間でリングを受け渡すハンドリング実験を行った。実験の結果、試作マニピュレータの位置決め精度は pitch 軸で 1.1mm、yaw 軸で 1.0mm、insertion/extraction 軸で 3.3mm であった。クランク軸の構成に必要なワイヤ張力は 32N、鉗子先端の作用力は 1.2N であった。ハンドリング実験では図 2 (c)に示すように、手動で従来鉗子を巧みに操ることによってリングの受け渡しは可能であった。これにより、マニピュレータを補助的に操る場面では、広い視野と作業範囲でマニピュレータが動作することを確認できた。しかし、

マニピュレータを主体的に操る場面では、位置決め精度と作用力の向上、および作業範囲の拡大が必要であることが明らかとなった。今後は改良機の開発を行っていく。

本研究を助成いただいたカシオ科学振興財団に感謝致します。

[発表論文]

1. Toshikazu Kawai, Toshinobu Matsumoto, Yuki Horise, Atsushi Nishikawa, Yuji Nishizawa, Tatsuo Nakamura: Flexible Locally Operated End-Effector Manipulator With Actuator Interchangeability For Single-Incision Laparoscopic Surgery, Int J Computer Assist Radiol Surg, Vol.10, Suppl 1, pp.246-247 (2015).
2. 河合俊和, 松本俊宣, 西川敦, 西澤祐吏, 中村達雄: ローカル操作方式マルチアングルマニピュレータの駆動ユニット, 日本コンピュータ外科学, Vol.17, No.3, pp.281-282 (2015).
3. Toshikazu Kawai, Toshinobu Matsumoto, Atsushi Nishikawa, Yuji Nishizawa, Tatsuo Nakamura: Locally operated multi-angle manipulator for single-port laparoscopy, 生体医工学シンポジウム 2015, 2P-20 (2015).
4. 松本俊宣, 河合俊和, 西川敦, 西澤祐吏, 中村達雄: 単孔式腹腔鏡下手術支援フレキシブル鉗子マニピュレータの設計, 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.1779-1782 (2014).
5. 河合俊和, 友兼賢大, 西川敦, 西澤祐吏, 中村達雄: ローカル操作型鉗子マニピュレータの手元スイッチ型 5 自由度インタフェースの開発, 第 54 回日本生体医工学会大会, p.204 (2015).

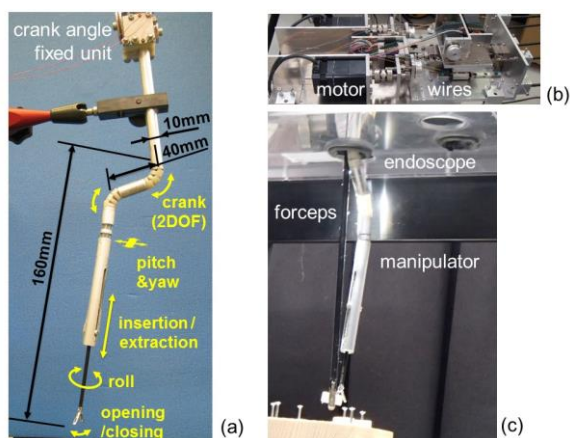


図 2 (a) マニピュレータ試作機構、(b) 鉗子駆動用モータユニット、(c) ハンドリング実験の状況

【26】 歯槽骨再生誘導療法のための骨膜伸展型エミュレーションデバイスの開発

研究者 東北大学大学院 歯学研究科 講師 山内 健介

〔研究の概要〕

顎骨・歯槽骨における骨欠損の要因は、悪性腫瘍やその類似疾患による外科療法、先天奇形や歯牙欠損後の顎堤萎縮などが挙げられる。欠損部に対する治療としては、移植医療が中心であり、特に硬組織においては自家骨移植がいまだに第一選択である。しかしながら採取部の負担、煩雑な手術手技、感染など課題は多く存在する。この 10 年間、骨の再生治癒能力を応用した骨延長法が応用されてきたものの、複雑な装置の使用、撤去術の複数回の手術など克服すべき欠点を有していることが判明している。今回、形状記憶合金と形態回復力を応用した骨膜伸展型エミュレーションデバイスを開発・応用し、装置の作動に関して徒手的な操作や外科的侵襲を一切加えずに行うことを目的とする。

〔研究経過および成果〕

使用した骨膜伸展エミュレーションデバイスはメッシュ状形状記憶合金であり、NiTi を主とし、組成は Ni; 56.1, Ti; balance, Fe; 0.05, O; 0.05, C; 0.03, N; 0.02, wt.%である。幅 5mm、長さ 25mm、厚みは 0.275mm であり、中心部は凸形態を示すドーム型である（図 1）。形態回復力は中央部が基底面に接するまでの応力として $2.7\text{N}(=0.9 \div 5 \times 15)$ であった。

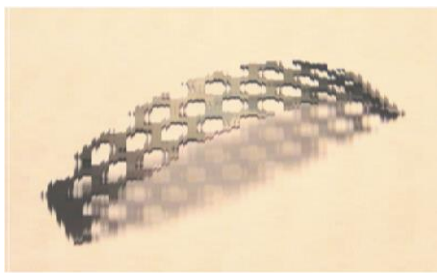


図1: NiTi 製骨膜伸展エミュレーションデバイス

本デバイスの骨膜伸展に伴う骨新生評価については東北大学動物実験施設の規定遵守のもと、ウサギ頭頂骨を使用して行われた（図2）。



図2 ウサギ頭頂骨へのデバイス使用

ラビット頭頂部の皮膚切開・骨膜切開を施行し、骨膜剥離を行い、骨面を明示した。骨面上にデバイスを置き、下記の 4 群に分けて実験を施行した。

Control 群: デバイスを骨面上に置き、骨膜縫合、皮膚縫合を行う。

PEO 群: デバイスを骨面上に置き、中央部を骨面に圧着させ、チタン製スクリューで固定し、骨膜縫合、皮膚縫合を行う。術後 14 日目で固定スクリューを除去して、骨膜伸展を開始。

PEO+Deco 群: PEO 群と同じ術式であるが、骨面の表面である皮質骨をラウンドバーにて骨穿孔（decortication）を行う。同じく術後 14 日目に固定スクリューを除去して骨膜伸展を開始。

TIME-PEO 群: デバイスを骨面に圧着させ、生体吸収性糸を用いて、デバイスを縫合固定し、骨膜縫合、皮膚縫合を行う。糸の生体吸収過程に伴い、時限的な伸展作動を行う。

以上の 4 群で、それぞれ術後 5 週と 8 週の試料を採取し評価した。評価項目としては、臨床所見、 μ CT 撮影による硬組織評価、画像解析ソフトによる新生骨占有率 (Histomorphometrical analysis) と染色 (Hematoxylin-eosin 染色、Elastica-Masso、Villanueva-bone 染色) による組織学的評価であった。

全ての群においてデバイスに対するアレルギー反応や皮膚露出、術後感染は認めず、資料採取が可能であった。骨膜伸展に伴う、デバイスの伸展距離は垂直的に平均 2.9mm であり、デバイス上部の骨新生は認められないものの、デバイスと母骨の間隙には新生骨が確認された(図3)。

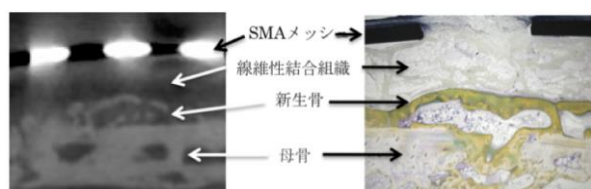


図3 μ CT 画像および組織写真 (Villanueva-bone 染色)

Control 群では 5 週群、8 週群ともに新生骨の形成は少なく、母骨側からの薄い幼若な新生骨が確認された。PEO 群では母骨側から層状の新生骨を認め、5 週群よりも 8 週群において、より多い量の新生骨を認めた。PEO-deco 群では、PEO 群と比較して、5 週群、8 週群共に多くの新生骨を認め、母骨と新生骨の境界が不明瞭となっていた。また、TIME-PEO 群では、他の群と同様に母骨側からの新生骨の確認ができたが、Control 群よりは多いものの、PEO-deco 群よりは少ない量であった(表1)。

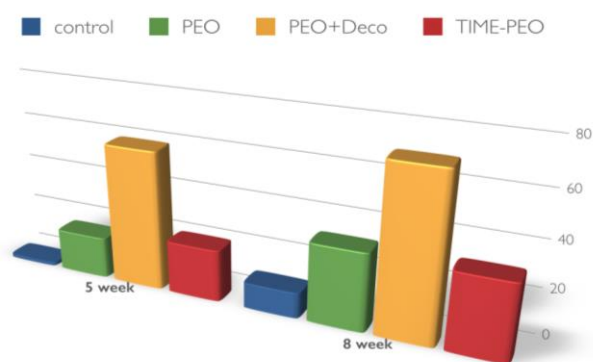


表1 骨膜伸展間隙での新生骨占有率

以上の結果より、Control 群より他の3群全てにおいて新生骨量が多いことから、骨膜伸展刺激による骨形成能力の発現は得られており、デバイス自体の骨膜伸展能力は獲得されていることが示唆された。さらに PEO-deco 群が PEO 群よりも多くの新生骨を獲得していることから、骨膜伸展刺激のみならず、骨内からの骨形成能を引き出すことで安定した結果が得られることが示唆され、TIME-PEO 群での新生骨の獲得は、単回手術での時限的骨膜伸展刺激を付与する新たな可能性を示唆するものであった。今後は歯槽骨での至適伸展力を持った骨膜伸展エミュレーションデバイスの開発と応用を行う予定である。

[発表論文]

1. The effect of decortication for periosteal expansion osteogenesis using shape memory alloy mesh device. Yamauchi K, Nogami S, Tanaka K, Shimizu Y, Kanetaka H, Takahashi T. Clin Implant Dent Relat Res. e376-384, 2015
2. Osteogenesis due to periosteal elevation with degradable and nondegradable device in Gottingen minipigs. Dziewiecki D, van de Loo S, Gremse F, Kloss-Brandstatter A, Kloss F, Offermanns V, Yamauchi K, Kessler P, Lethaus. J Craniomaxillofac Surg. In press, 2016.

【27】新規心臓ペースメーカー作製を目指した心臓の生理学的解析

研究者 京都大学 大学院医学研究科 特任講師 山本 正道

〔研究の概要〕

心臓は全ての動物の生命活動の中枢となっている臓器である。ヒトにおいて、特に先進国では心疾患は主要な死亡原因の一つである、心疾患の診断や解析は臨床では心電図・超音波検査・CT 検査・MRI 検査・心臓カテーテル検査など、基礎では生化学的方法・電気化学的方法などいずれも。心臓全体を組織・部位として捉えた低解像度の空間を時間軸に沿って解析するに留まっている。そのため、ペースメーカーも電氣的な刺激を与えるのみで、心臓全体を正常に機能させる制御機構は有していない。そこで、私はマウス生体内で心臓が拍動する時に取り得る ATP 量変化を心臓丸ごと、1 細胞レベルで解析する。これにより、心臓の新しい生理学機能を詳細に記述し、新規ペースメーカー作製に寄与するだけでなく、各心疾患における機能低下部位特定を細胞レベルで明らかにする事で疾患の理解や治療薬の開発を目指す。

〔研究経過および成果〕

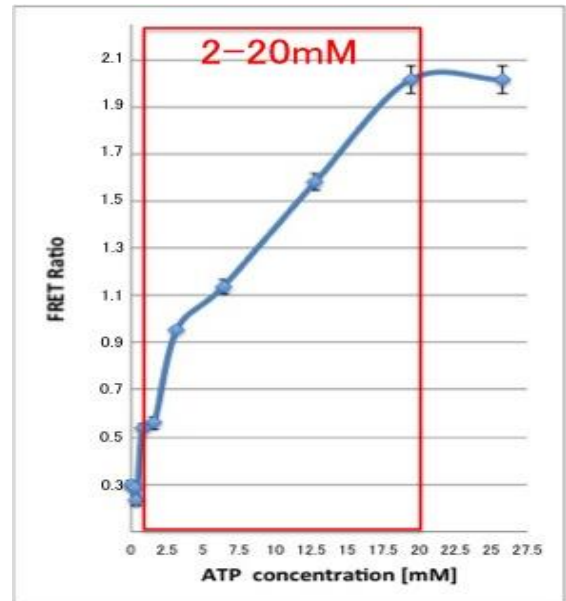
2009 年に開発された ATP 濃度を可視化するプローブ(*ATeam*)は細菌の ATP 合成酵素を構成する蛋白質の一つである ϵ サブユニット(ATP 結合タンパク質)を介して 2 つの蛍光タンパク質を結合させて作成されている。この 2 つの蛍光タンパク質として輝度値が高く、長波長側に存在する *GFP* と *KusabiraOrange* を用いて作製した *GO-ATeam*(以下 ATP プローブ)を用いることにした。この融合タンパク質は ATP 濃度が上昇すると ϵ サブユニット部分が構造変化して *GFP* を励起する 488nm の光を当てても *GFP* から *KusabiraOrange* への蛍光共鳴エネルギー移動(FRET)が起こり、*GFP* 由来の蛍光が減少して *KusabiraOrange* 由来の蛍光が主に発せられるようになる。これをマウスへ導入する事で高解像度にエネルギーの増減を計測していく。

ATP プローブをマウス *ROSA* 領域に挿入した形でノックインマウス作成を行った。また、ATP プローブの機能を時空間制御するために *LoxP* で挟まれたストップ配列を ATP プローブの前に挿入し、*Cre* が発現する時空間でのみ ATP プローブが発現し得る構築を施した。

ATP 可視化マウスは ES 細胞にエレクトロポレーション法によりターゲティングした後に薬剤耐性により選択、PCR 法及び Southern Blotting 法によりターゲティングされた ES 細胞を取得した。その後、この ES 細胞を用いてアグリゲーション法により morula 期の受精卵と融合させた後に偽妊娠マウスの子宮へ戻してキメラマウスを得た。キメラマウスと C57BL/6 のマウスを交配する事で F1 マウスを得た。F1 マウスは PCR 法により遺伝子型を判定した。F1 マウスと全身で *Cre* タンパク質を発現する *CAG-Cre* トランスジェニックマウスと交配する事で全身の cytoplasm に *GO-ATeam* を発現するマウスを得た。

生体内 ATP 可視化マウスと C57BL/6J を交配させた後、受精後 13.5 日でマウス胚を回収し、*GO-ATeam* がノックインした MEF 細胞を樹立した。この MEF 細胞を黄色ブドウ球菌由来の α -toxin (α -Hemolysin) を加えた Permilization buffer (140mM KCl, 6mM NaCl, 0.1mM EGTA, 10mM HEPES (pH 7.4)) で処理することで脂質二重膜に穴を開けることにより培養液が細胞内部へ浸入できるようにした後に、Caliblastion buffer (140mM KCl, 6mM NaCl, 0.5mM MgCl₂, 10mM HEPES (pH 7.4)) へ置換した後、この液の ATP 濃度を MgATP を添加することにより変化させて、その時に ATeam が発する蛍光から得られる FRET ratio を基準にして ATP 濃度と GO-ATeam の FRET ratio の関係を計測した。その結果、GO-ATeam1 では 2-20mM の間で約 4.5% の誤差値で直線的な正の相関性が観察された。これより生体内 ATP 可視化マウスを用いることで 2-20mM の間で ATP 量を定量できる事が示唆された(右図)。

麻酔処置した後に人工呼吸器管理下で開胸して心臓の心拍を観察した。その結果、GO-ATeam1 を用いた ATP 可視化マウスではほとんど FRET ratio 変化が見られなかった。一方、GO-ATeam2 を用いた ATP 可視化マウスでは心筋の弛緩時に ATP 量の上昇、心筋の収縮時に ATP 量の減少が観察された。特に心室より心房において、この ATP 量の増減は大きく観察された。次に ATP 動態により心臓の機能を評価できるかを検討した。ヒトの心筋梗塞は臨床的には主に左前下行枝で起こることが知られており、栄養および酸素不足により梗塞部位では ATP の枯渇が報告されている。



そこで、成体マウスの左前下行枝を手術糸で結紮して 5 日後に開胸して心筋梗塞を起こした心臓を観察した。その結果、梗塞部位では ATP が低下していた。一方、梗塞部位を取り囲むように正常な心筋部位では ATP 量が亢進している事が明らかとなった。このことより、心臓における機能を ATP 動態として評価できる可能性が示唆された。

〔発表論文〕

現在、投稿準備中。

〔謝辞〕

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人 カシオ科学振興財団より研究助成を賜りました事を心より感謝申し上げます。

【28】 櫛形電極の誘電泳動を利用する間葉系幹細胞スフェロイドの作製

および力学的刺激に基づく分化制御

東京大学大学院総合文化研究科 准教授 吉本 敬太郎

〔研究の概要〕

細胞に物理刺激を与えるデバイスを作製するため、誘電泳動用電極を利用する新しい手法を考案した。誘電泳動は、粒子懸濁液に外部から不均一な交流電場をかけると粒子と溶液が分極し、溶媒の誘電率と粒子の導電率の違いによって粒子に力が加わり、電極内で粒子が泳動する現象である。同技術は元々粒子の分離・配列・分析・操作に用いられていたが、近年では細胞に対しても同様な用途で使用されている。本研究で構築したデバイスを用いて間葉系幹細胞株である UE7T-13 に対して力学的刺激を与えたところ、様々な分化誘導関連遺伝子の発現量が変化することが明らかとなった。

〔研究経過および成果〕

間葉系幹細胞（MSC: Mesenchymal Stem Cell）は、今から約 40 年前に骨髓液から発見され、同じく幹細胞である受精卵由来の ES 細胞や、人工多能性幹細胞の iPS 細胞よりも歴史が古く、臨床応用が進んでいるもう一つの幹細胞である。ヒトの体の中に存在するいわゆる天然の幹細胞であるため、安全性の高い再生医療用細胞資源であることから、MSC の分化能を ES 細胞や iPS 細胞のレベルまで改善することができれば、同幹細胞らを超えた重要な幹細胞ソースになりうる。

分化能を含めた MSC の機能と足場環境との関係は徐々に明らかとなりつつあるが、未だ外部刺激と分化機構に関する知見は不足している状況にある。このような背景のもと、本研究では、細胞に対して様々な物理刺激を与えることができる新規デバイスの作製を試みることを目的とした。細胞に対して物理刺激を発生させる原理として、細胞の誘電泳動現象を利用することを着想し、細胞に任意の強さの物理刺激を加えることのできる電極デバイスを考案した。

誘電泳動による細胞操作は、細胞に様々な強さ、時間およびタイミングの力学的刺激を与えることのできる自由度の高い手法である。このようなデバイスを用いて力学的刺激と細胞機能の関係性が明らかとなれば、生命科学分野における MSC の基礎研究のみならず、再生医療分野における応用研究など幅広い分野に対して大きな波及効果が期待できる。

本研究では、細胞に任意の物理刺激を精度良く与えるための誘電泳動用電極デバイスのプロトタイプを作製と、ヒト骨髓由来間葉系幹細胞株 UE7T-13 を用いて同デバイスの機能評価を行った。

まず、既に他のグループによって誘電泳動が報告されていたヒト骨髓性白血病細胞株 HL-60 を、構築したデバイス流路内に流し込み、誘電泳動前後における泳動挙動を確認した。図 1 に HL-60 の正の誘電泳動および負の誘電泳動の結果を示す。新規に設計した電極デバイスを用いた場合でも、周波数を変化させることで同一溶媒中において正負逆の誘電泳動を発現させることが可能であった。同様に UE7T-13 の誘電泳動を行ったところ、同様の現象が

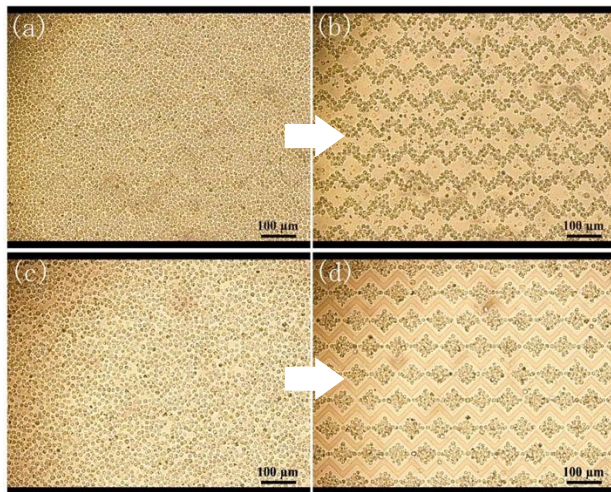


図1 HL4Oの誘電泳動挙動

上段： (a) 正の誘電泳動前、(b) 正の誘電泳動後

下段： (c) 負の誘電泳動前、(d) 負の誘電泳動後

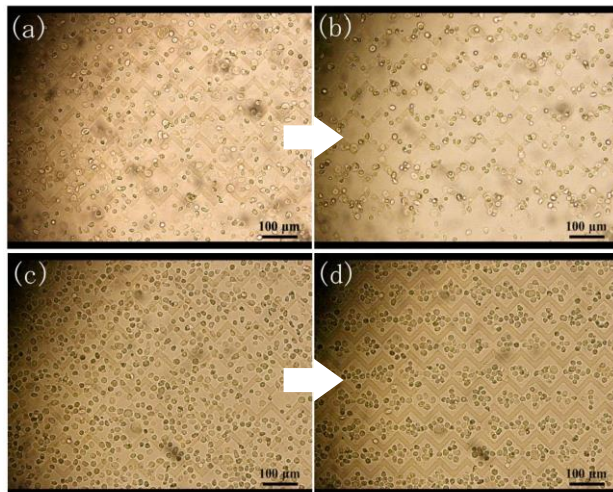


図2 UE7T-13の誘電泳動挙動

上段： (a) 正の誘電泳動前、(b) 正の誘電泳動後

下段： (c) 負の誘電泳動前、(d) 負の誘電泳動後

観測された。細胞の泳動挙動は周波数以外に、細胞懸濁液の導電率、細胞種、電極の設計の違いによって変化し、溶媒の導電率が高い溶液では誘電泳動力が弱くなった。正の誘電泳動では電極上に細胞が押しつけられ、負の誘電泳動では電極間に細胞が集積して細胞塊(スフェロイド)を形成した。

誘電泳動による物理刺激が、UE7T-13 の遺伝子

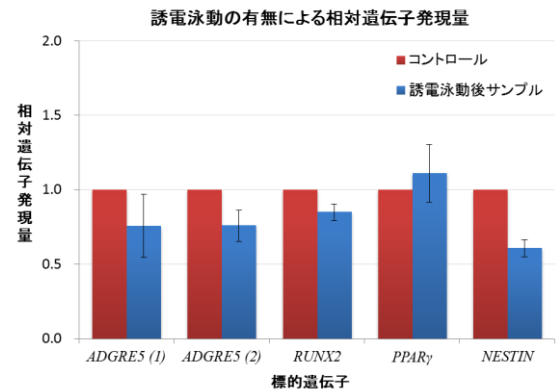


図3 誘電泳動後のUE7T-13の遺伝子発現量の変化
構築したデバイス内に、同じ時間(1時間)誘電泳動
無しで静置サンプルをコントロールとして規格化

発現に与える影響を調査するため、Real Time RT-PCR を用いて正の誘電泳動後における遺伝子発現量の変化を測定した。図3に示すとおり、細胞が物理刺激を受けた際に発現量が低下するとされている *ADGRE5*、骨芽細胞分化マーカー *RUNX2*、脂肪細胞分化マーカー *PPAR γ* の各種遺伝子の発現量が優位に低下するという結果が得られた。以上の結果から、本デバイスを用いて MSC に物理刺激を与えることができること、さらに分化に関連する遺伝子に変化することが明らかとなった。

今後は、力かける時間の長さ、強さ、タイミングを変化させることで分化誘導関連遺伝子の発現量がどのように変化するかを調査する。また、本デバイスはスフェロイド状態を簡単に作成できるため、力学的刺激だけでなく、組織化の効果も併せて検討できる。

[学会発表]

1. YOSHIOKA, Junya; YASUKAWA, Tomoyuki; YOSHIMOTO, Keitaro “Development of evaluation device for physical stimulation to cell based on dielectrophoresis”日本化学会第96春季年会、3月24日、京都。

【29】 全人工膝関節置換術のリスク回避に寄与する高分解能圧力センサ内蔵インサートの開発

研究者 福井大学大学院工学研究科 准教授 長宗 高樹

〔研究の概要〕

高齢化社会が進むわが国では、年間4万件超の全人工膝関節置換術が行われているが、人工関節の膝の内外にかかる圧力バランスが適切でない場合には人工関節の一部であるインサートの摩耗が早まり、人工関節の短寿命化に繋がる。本研究では、術中にこの内外の圧力バランスを高精度の計測できるシステムの開発を目指す。実験では開発した圧力センサの精度評価を行った上で、2 機種の人工関節を用いて、大腿骨及び脛骨コンポーネントを様々な位置の設置したときの内外圧力バランスを計測し、人工関節の機種の差異を検証した。

〔研究経過および成果〕

全人工膝関節置換術では膝周りの筋肉等軟部組織によるテンションが膝の内外の圧力バランスに影響を与える。術者は軟部組織を適切に切除することでバランスを調整するが、現状では術者の主観に頼っており、この圧力バランスが不適切な場合、関節の接触面で応力が集中し、人工関節の一部であるインサートの磨耗が早まり、人工関節は「短寿命化」する。

本研究では、上記のようなリスクを低減するために、この応力集中の有無を計測し、定量的な指標を術中の医師に提供することで、術後の安全性を高めることを目的とする。具体的にはトライアルインサートに計測装置を内蔵し、応力集中を定量的に計測するシス

テムを開発する。

現在、臨床的に用いられている人工関節には Mobile 型と Fixed 型の二機種が存在する。二機種の機能の違いはインサートの回旋(内旋及び外旋)を許容の可否である。以前に我々が作成した計測用インサートでは配線が内側及び外側にそれぞれ引き回しを行っていた。しかし、その構造では臨床的には内側のみしか皮切りを行わないので、問題があることが分かった。そこで、本研究では配線を内側のみに引き回した構造に改善した。製作した Mobile 型と Fixed 型の構成を図1及び図2に示す。図から分かるように配線が内側のみから引き出されている。この構造を実現するために、基板の厚み及び導電性ゴムを実用に耐え得る範囲で極限まで削減する必要があった。

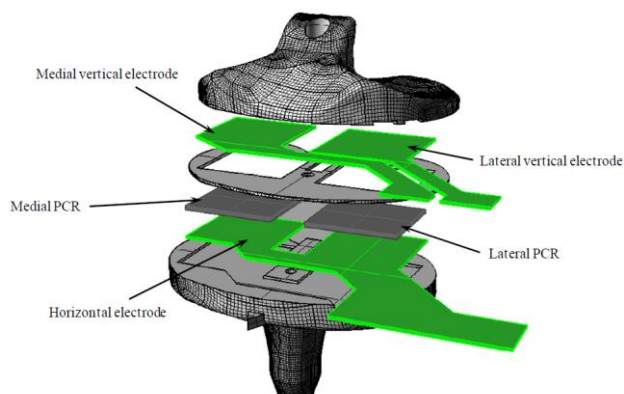


図1 Mobile型計測用インサート

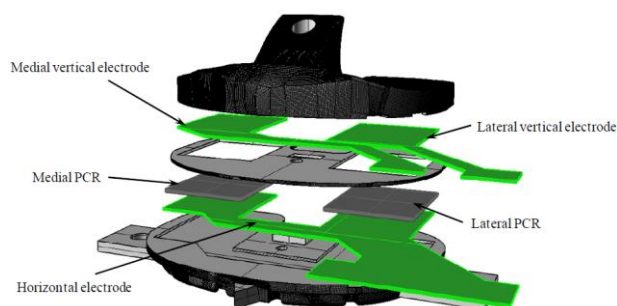


図2 開発したFixed型計測用インサート

開発した計測用インサートを用いて性能評価の実験と模擬膝関節における Mobile 型と Fixed 型での重心移動の挙動解析の実験を行った。性能評価実験においては0から200Nまでの応力負荷を行った際の誤差を評価した。また、応力負荷の推定精度を向上するため、Cubic Spline 及び Back Propagation Neural Network (440 ノードと 1260 ノード) のアルゴリズムを用いた。性能評価実験の結果を図3に示す。結果より、Cubic Spline を用いた推定が最も誤差が小さかった。次に、実際の人工関節の大腿骨コンポーネントと脛骨コンポーネントを模擬して、それらの設置位置をニュートラルポジションからずらした場合の Mobile 型と Fixed 型の重心移動の挙動を解析した(図4, 図5)。Mobile 型は Fixed 型と比較して、重心位置は安定していた。これは、Mobile 型の構造が内外旋を許容するので、脛骨コンポーネントの設置位置をニュートラルポジションでなくても Mobile 型インサートがその差を吸収することが分かった。これは臨床的に医師が主観として感じている印象を示すエビデンスとなる。

本研究では全人工膝関節置換術における内外バランスを評価する計測用インサートを開発した。代表的な二機種において評価を行った所、客観的な指標を示し、その指標が臨床所見と乖離していないことから、本システムが有用であることが示された。

[発表論文]

1. Mohd Hanafi Mat Som, Kouki Nagamune, Shogo Kawaguchi, Yusuke Shimizu, “A Study of In Vitro Kinematics of A Posterior Stabilized Fixed Bearing Prosthesis,” Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 2277–2282, Hong Kong, China, 2015.

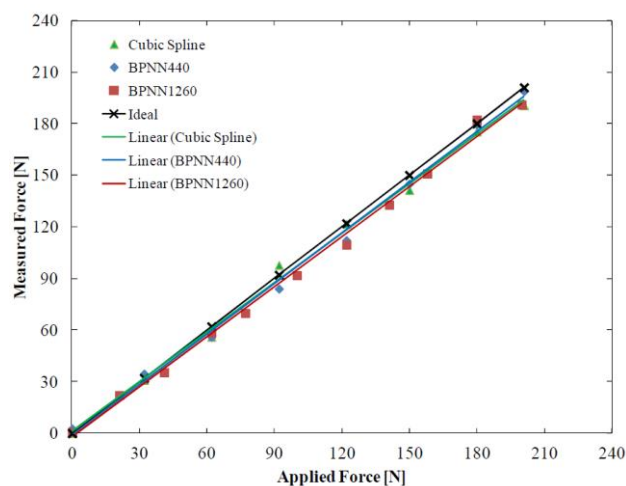


図3 性能評価実験

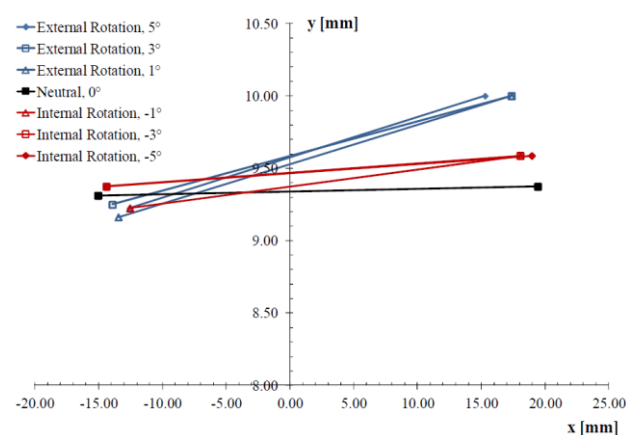


図4 Mobile型の内外旋における重心挙動

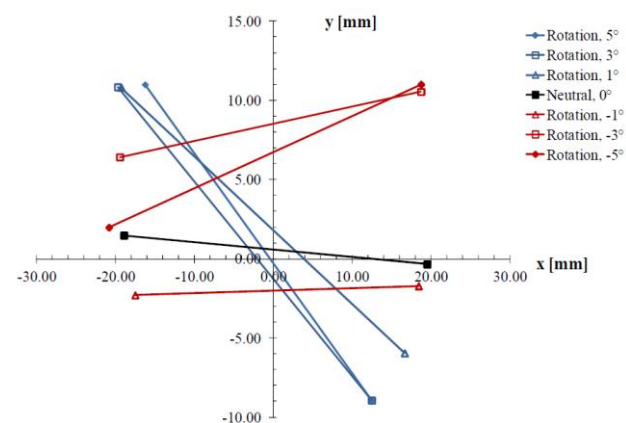


図5 Fixed型の内外旋における重心挙動

2. Mohd Hanafi Mat Som, Kouki Nagamune, Shogo Kawaguchi, “Performance Comparison of Conductive Rubber-based Sensor Array Calibration Using Cubic Spline and Back Propagation Neural Network,” vol. 18, no. 2, pp. 673–688.

【30】ブレインマシンインタフェースによる肢体不自由者の運動機能再建と健康増進を支援するシステムの開発と適用

研究者 大阪大学大学院医学系研究科 助教 柳澤 琢史

〔研究の概要〕

本研究では、3つの課題に取り組んだ。1) 肢体不自由者の脳活動から運動情報を抽出するための最適なパラメータ探索、2) 同パラメータを用いた義手操作による、肢体不自由者の脳活動状態制御と麻痺症状改善効果の検証、3) 脳磁系による神経義手の応答速度を改善し、被験者が自分の体を動かしているように感じるよう改良する。このため、肢体不自由者として腕神経叢引き抜き損傷患者9名、切断肢1名、脳卒中後患者5名、脊髄損傷5名、ALS等の神経変性疾患患者10名が研究に参加した。また、脳磁図によるBMI義手をこれらの患者へ適用した。得られた脳磁界信号を解析することで、肢体不自由者が運動を想起した際の特徴的な脳活動を同定した。また、この信号を用いて義手操作が可能であることを示し、英文専門誌にて報告した。さらに、システムの応答速度をあげるため、C言語を中心にシステムの再構築を行い、応答速度を改善できることを示した。

〔研究経過および成果〕

大阪大学医学部附属病院脳神経外科に通院する肢体不自由者に公募を行い、脳磁計測を行った。研究の実施にあたっては、大阪大学医学部附属病院倫理委員会で承認された研究プロトコルに従い、被験者の文章によるインフォームドコンセントを得た上で行った(No. 11125, 12107, UMINID000010180)。被験者の募集についてはほぼ当初計画通りに行い、腕神経叢引き抜き損傷、切断肢、脳卒中、脊髄損傷、ALS等の神経変性疾患患者が各5名以上で研究に参加した。

大阪大学医学部附属病院に設置している横河電機製160チャンネル脳磁計を用いて、オンラインで義手制御を行った。特に、高精度に皮質電位を推定できるVBMEG(ATR脳情報研究所)をオンラインで使えるようにプログラムを改良した。また、National Instruments製のFPGAボードからデータをオンライン

で取得し解析するために、これまでMATLABで行っていた処理をCで行うように改良した。これにより処理速度の大幅な短縮が実現した。

開発したシステムを肢体不自由者に適用し、義手制御の訓練を行った。患者は重度の麻痺症状があり、手を動かすことはできないが、動かすことを意図する際の脳活動だけから、その意図を推定できることが明らかになった。重度麻痺が長年ある患者でも、運動を意図した上肢と対側の感覚運動野に特徴的な反応

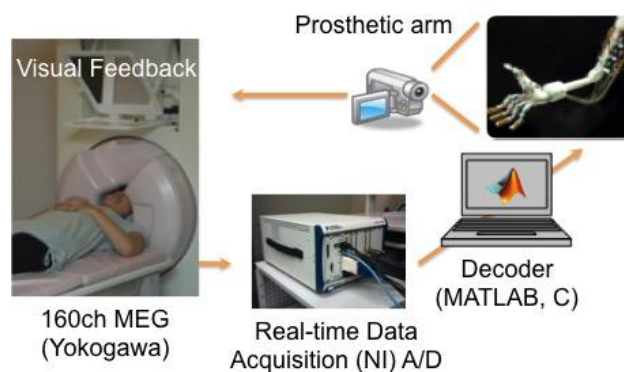


図1 リアルタイム脳磁計による義手制御

が得られた。信号源推定法にて皮質電位を求めると、感覚運動野の皮質電位に運動関連皮質電位(MRCP)や周波数毎に特徴的なパワー変化を認めた。これらの変化量を特徴量とすることで、意図しただけの運動を推定できた。推定は機械学習法を用いた。Support vector machine (SVM)や sparse logistic regression (SLR)、Gaussian Process Regression (GPR)を用いた。

患者は自分の麻痺した手の運動を意図することで、義手を操作し、その操作に習熟することで脳活動にも変化が見られた。特に、麻痺手に関連する感覚運動野での情報量が増加する傾向が確認された。ただし、訓練前後での患者上肢の運動機能には明らかな変化は見られなかった。今後は、訓練方法を変えることで、症状の改善を目指す。

これらの成果を英文専門誌にて報告した。脳磁図を用いた義手制御システムに関しては文献3にて報告し、麻痺患者への適用については文献5で報告した。また、運動だけでなく視覚認知についても同様の方法で解析し、人の視覚カテゴリー認知の情報処理を明らかにし文献4で報告した。さらに、頭蓋内脳波を用いて同様の研究を行い文献1、2で報告した。
〔発表論文〕

1. Morris S, Hirata M, Sugata H, Goto T, Matsushita K, Yanagisawa T, Saitoh Y, Kishima H, Yoshimine T., Patient Specific Cortical Electrodes for Sulcal and Gyrus Implantation., IEEE Trans Biomed Eng. Vol.62, No.4, April, 1034-1041 2015
2. Proceedings of the Seventh International Workshop on Advances in Electrocorticography, Anthony Ritaccio, Riki Matsumoto, Martha Morrel, Kyouosuke Kamada, Mohamad Koubeissi, David Poeppel, Jean-Philippe Lachaux, Takufumi Yanagisawa, Masayuki Hirata, Chirstoph Guger, Gerwin Schalk, Epilepsy and Behavior 51 (2015) 312-320
3. Ryohei Fukuma, Takufumi Yanagisawa*, Shiro Yorifuji, Ryu Kato, Hiroshi Yokoi, Youichi Saitoh, Haruhiko Kishima, Masayuki Hirata, Yukiyasu Kamitani, Toshiki Yoshimine, Closed-Loop Control of a Neuroprosthetic Hand by Magnetoencephalographic Signals, PLoS One, 2015 Jul 2;10(7):e0131547.
4. Misaki Nakamura, Takufumi Yanagisawa*, Yumiko Okamura, Ryohei Fukuma, Masayuki Hirata, Toshihiko Araki, Yukiyasu Kamitani, Shiro Yorifuji, Categorical discrimination of human body parts by magnetoencephalography, Front. Hum. Neurosci., 04 Nov 2015
5. Ryohei Fukuma, Takufumi Yanagisawa, Youichi Saitoh, Koichi Hosomi, Haruhiko Kishima, Takeshi Shimizu, Hisato Sugata, Hiroshi Yokoi, Masayuki Hirata, Yukiyasu Kamitani, Toshiki Yoshimine, Real-Time Control of a Neuroprosthetic Hand by Magnetoencephalographic Signals from Paralysed Patients, Scientific Reports, in press

【31】 感情的プロソディを変更する気分誘導方法を用いた 認知症の行動・心理症状を緩和するシステムの研究開発

研究者 佐賀大学大学院工学系研究科 准教授 中山 功一

佐賀大学 客員研究員 大島 千佳

〔研究の概要〕

本研究では、発話中の感情的プロソディ(韻律)をリアルタイムに変更するシステムを提案した。そのシステムを実現する音声変換アプリケーションを開発した。また、被験者実験から、音声変換による心的状態の変化を検証した。被験者には、二人一組で実験をしてもらい、実験中の会話はマイクとヘッドフォンを通して行われた。実験は3セット行われ、片方の被験者には、プロソディ変換システムを利用してもらい、①無変換、②自分の声を変換してフィードバック、③自分の声を変換して相手に送る、という3つの条件を、1セット毎に変えながら行った。その結果、プロソディ変換により発話者の気分を誘導できることがわかった。

〔研究経過および成果〕

一般的に介護者の負担となるのは、奇声や徘徊、暴力や妄想などのBPSDである。BPSDを緩和する薬物以外の療法として、心理療法が期待されている。本研究では、認知症患者の声に含まれる「感情的プロソディ(感情によって変化する韻律)」をリアルタイムに変更してフィードバックすることで、患者を適切な気分へ誘導し、BPSDの緩和を目指す。認知症患者を適切な気分へ誘導するためには発話音声の感情的プロソディをどのように変更・付与することが適切かを、実験的に明らかにする。

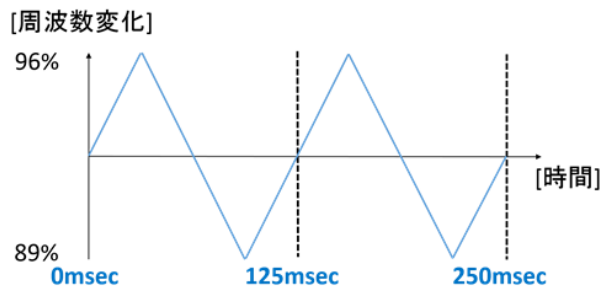
開発するシステムは、音声を入力するマイク、音声処理するPC及びプログラム、変換した音声を入力するヘッドフォンからなる。音声処理するプログラムは、マイクから入力された音声の音高と音量を検出する。次に、検出された音高と音量の値に従って、音高と音量を変換する。最後に、変換した音声ヘッドフォンから出力する。

開発したシステムを使って、気分誘導の実験を行った。被験者は、20代の男性12名を無作為に分けた6ペアとした。2つの部屋に分かれてコンピュータを通じて対話してもらった。一方の被験者のみがプロソディ変換システムを利用し、以下の3セットを行った。

- ① 無変換
- ② 自分の声を変換してフィードバック
- ③ 自分の声を変換して相手に送る

音声の変換方法は、「悲しげ」な印象を付与するために、元の音声全体の周波数を4%下げ、さらに、その周波数を125ミリ秒毎に±約4%の範囲で増減させた(次ページ左上図)。





実験では、各セットが終了するごとに、被験者自身の疲れ具合や気分について、7段階による評価を紙面により実施した。

実験結果は、前記3セットのうち、①の被験者の平均値を基準とし、以下の4条件の被験者の平均値について、①との差分を考察する。

- ②-1 自分に自分:変換した自分の音声を自分が聞いている場合
- ②-2 自分に相手:変換した相手の音声を相手が聞いている場合(②-1の相手ペア)
- ③-1 相手に:変換した自分の音声を相手が聞いている場合
- ③-2 相手から:変換した相手の声を自分が聞いている場合(③-1の相手ペア)

実験結果の例として、被験者が自分自身の疲れ具合や気分について主観評価した結果を右図上に、被験者が相手の疲れ具合や気分について推測した結果を右図下に示す。

右図上の被験者自身の疲れ具合や気分について回答した実験結果の「③-2 相手から」から、相手の声を変換しているにもかかわらず、自分自身の楽しい気分やゆったりとした気分が大きく減少し、逆に沈んだ気分や悲しい気分、疲れが大きく増加していることがわかる。

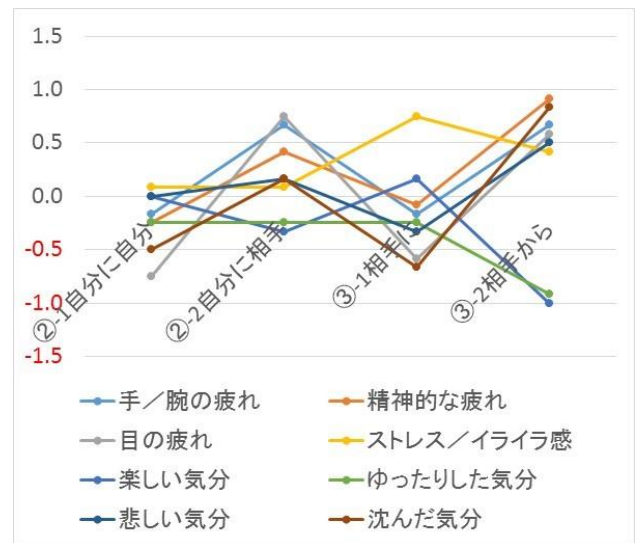


図:被験者自身が感じた疲れと気分の差分

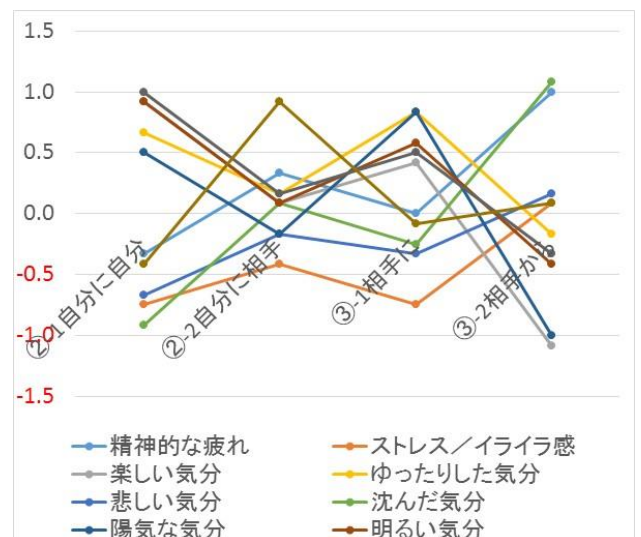


図:推測された相手の疲れと気分の差分

また、右図下の相手の疲れ具合や気分について推測した結果の実験結果の「②-1 相自分に自分」から、自分の音声を変換しているにもかかわらず、相手の明るい気分、陽気な気分などが大きく上昇し、逆に沈んだ気分や悲しい気分、ストレス/イライラ感が大きく減少していることが分かる。

これらの結果から、プロソディをリアルタイムに変換した音声のフィードバックにより、発話者や対話相手の気分を誘導できる可能性が明らかとなった。

【32】 放散近赤外光を用いた高精細リアルタイム脳機能計測技術の開発

研究者 広島市立大学大学院情報科学研究科 教授 樋脇 治

〔研究の概要〕

現在使用されている非侵襲的脳機能計測法は、空間分解能、時間分解能、測定中の動きの自由度、コスト等の点において短所を有している。本研究では、これらの非侵襲的脳機能計測法の短所を克服する新しい脳機能計測技術を開発した。口蓋に設置した LED から近赤外光を脳に向けて照射し、脳底部から近赤外光を脳に透過させ、脳の電氣的活動に伴いリアルタイムで変化する透過光信号を頭皮上で計測する手法を開発した。

〔研究経過および成果〕

非侵襲的脳機能測定法のなかでも、近赤外脳機能計測法 (fNIRS) は生体に近赤外光を照射し、その反射光から生体内の酸素化/脱酸素化ヘモグロビンの濃度変化を検出し脳活動を評価する方法であり、他の非侵襲的脳機能測定法に比べて空間分解能は劣るが、簡便であり、被験者の動きに対する制約が少ないという利点を持っている。この fNIRS の利点を生かしたまま空間分解能を高めることができれば理想的な脳機能計測法となると考えられる。本研究では、fNIRS における脳への近赤外光の入射方法を変え、図 1(b)のように脳底部から上方向に脳を透過するように近赤外光を照射し、頭皮上で透過光信号を検出することにより脳活動を計測する方法を開発し動物実験により有効性の検証を行なった。

ヒトと脳の構造が類似しているサル(コモンマーモセット)を用いて実験を行なった。ポリエチレン樹脂でコモンマーモセットの口蓋をかたどりすることによってマウスピースを作成し、近赤外光 LED(SFH4716S, OSRAM)をマウスピースに埋め込むことにより近赤外光 LED が口蓋に密着するようにした。図2のように口蓋に設置した近赤外光 LED から上方に向けて近赤外光を照射し、頭皮上に置いた光検出器(光センサ

モジュール H10722-20, 浜松ホトニクス)により透過光を計測した。近赤外光の強度変化に対する光検出器での透過光の計測値の変化を調べた。その結果、近赤外光の強度変化に対して頭皮上での透過光強度の計測値は比例して変化し、口蓋から頭皮まで近赤外光が透過することが確認された。また、口蓋から照射した近赤外光は、頭蓋内部で散乱し、頭皮上の全域に渡って透過することがわかった。

次に、実際の脳活動が本開発手法により計測可能であるか体性感覚誘発信号を対象として検証を行なった。図2のようにコモンマーモセットの手首の正中神経を電気刺激装置で刺激することにより出現する体性感覚誘発信号を対象として、頭皮上での透過光を光検出器で計測した。脳電位計測装置で体性感覚誘発電位を同時に計測し、これと光検出器で計測される透過光信号とを比較することにより、透過光信号の計測により神経の電氣的活動が計測できるか検証を行なった。口蓋から波長 850nm の近赤外光を 150mW の強度で連続照射し、手首正中神経刺激前後の光検出器の信号を計測した。コモンマーモセットにアルファキサロン 1mg/kg を筋注することにより導入麻酔を行ない、0.5%, 1.5l/ml のイソフルランで麻酔を維持した。金メッキ加工した太さ 0.2mm, 長さ 1mm の双極電

極により手首正中神経を電気刺激した。電気刺激の期間は0.2msとし、刺激間隔を5sとした。刺激時刻前500msから刺激後4sまでの光検出器の出力をサンプリング周期 2kHz で A/D 変換器を介して PC に取り込んだ。光検出器の直径 8mm の受光面と頭皮の間に外径 12mm、内径 6mmのリング状 Ag/AgCl 電極を挟むことによって光検出器で計測した部位における体性感覚誘発電位を計測した。体性感覚誘発電位は、脳波アンプにより 10,000 倍に増幅し、500Hz のローパスフィルタを通過後の信号をサンプリング周期 2kHz で A/D 変換器を介して PC に取り込んだ。光検出器の出力および体性感覚誘発電位の計測部位は、頭骨頂の後方 5mm、刺激対側 5mm の位置とし、100 回の加算平均を行い信号抽出を行なった。その結果、光検出器の出力において、手首正中神経刺激後約 30ms に信号が出現し、潜時約 100ms に陰性ピーク、潜時約 300ms に陽性ピークが見られた。光検出器で計測された体性感覚誘発信号の波形は、体性感覚誘発電位のほぼ一致していた。

従来の fNIRS では、頭皮上から頭部に近赤外光を入射し頭皮上に返ってくる光を検出しているが、その信号は血流内の酸素化/脱酸素化ヘモグロビンの濃度変化を反映したものであると考えており、信号の出現する時刻は刺激等の事象が起こってから数秒後になる。そのため、神経電気信号のようなミリ秒オーダーでの速い信号を計測することは難しい。本研究では、口蓋から近赤外光を脳に向けて照射し頭皮上において透過光を検出する方法を用いれば、神経電気活動に由来する速い信号を計測でき高時間分解能での脳機能計測が可能であることを明らかにした。今後、複数の光検出器を用いて頭皮上の広領域で透過光を同時計測することにより、本開発手法の空間

分解能についても検証を行なっていく予定である。

謝辞: 本研究を実施するにあたり研究助成を賜りましたカシオ科学振興財団様に深謝申し上げます。

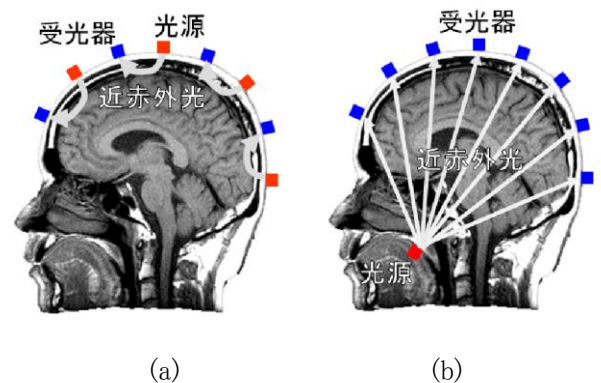


図 1. 従来の fNIRS と本研究で開発した脳機能計測システムの光源と受光器の配置

(a) 従来の fNIRS の手法

(b) 本研究で開発した脳機能計測システムの手法

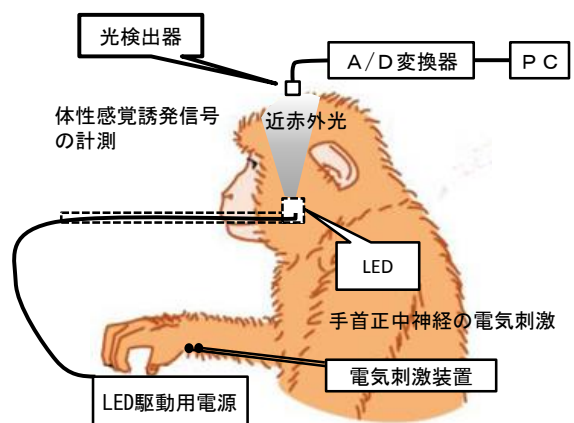


図 2. 体性感覚誘発信号計測による本研究で開発した脳機能計測システムの有効性の検討

【33】 無細胞マイクロ血管モデルの開発

研究者 東洋大学理工学部 講師 佐々木 直樹

〔研究の概要〕

直径 100 nm 程度の粒子に薬物を封じ込めた「ナノ薬剤」を用い、薬物を腫瘍選択的に送達する研究が盛んに取り組まれている。このナノ薬剤の新規評価系としての応用を目指し、微細加工技術で作製したマイクロ流体デバイスを用いて、細胞を用いずに血管モデルを作製した。腫瘍血管壁のモデルとして多孔膜をマイクロ流路内に配し、ナノ粒子の透過性評価を実証した。理論との比較考察では一部課題が残った。血球に見立てたマイクロ粒子の存在がナノ粒子の透過性を減少させることも明らかにした。本研究はナノ薬剤の血管透過性に関する基礎的かつ精密な知見を与え、化学・工学にとどまらず諸分野の発展にも寄与するものと考えられる。

〔研究経過および成果〕

近年、半導体微細加工技術で作製したマイクロ流体デバイスを用い、血管モデルを構築する研究が盛んに取り組まれている。これらの研究では、マイクロメートルスケールの流路内で、血管内皮細胞を溶液流れ下で培養することで、生体内に近い環境での実験を可能としている。

上述のマイクロ血管モデルが様々な実験対象へと応用される中で、血管壁の物質透過性を調べて創薬応用を図る研究が着目されている。すなわち、正常血管では内皮細胞が密に結合し物質漏出を防いでいるのに対し、腫瘍血管は正常血管に比べて構造が疎になっているため、直径 100 nm 程度の粒子は腫瘍血管でのみ血管外に漏れ出る。従って、この粒子に薬物を封じ込めた「ナノ薬剤」を用いれば、腫瘍選択的な薬物送達が可能である。

これまで、ナノ薬剤の評価には主に動物実験が用いられてきた。しかし、動物実験では腫瘍に薬物が集積されるか否かといった基準でしか評価できない。トランスウェル等の培養細胞を用いる実験系では、多

孔膜上に細胞を培養して透過性を評価できるものの、血管に比べてサイズが大きく血流に相当する溶液流れもない。従って、生体内でナノ薬剤が血管壁をどのように透過するのか、そこにはどのような支配因子が存在するのか、全く分からない状況である。

研究者はマイクロ流体デバイスを用いた新たな細胞培養システムを構築し (Electrophoresis, 33, 1729 (2012))、血管・リンパ管内皮細胞層の透過性評価に応用できることを示してきた (PLOS ONE, 10, e0137301 (2015))。その一方で、細胞を全く使わない無細胞マイクロ血管モデルを構築し、これがナノ薬剤の血管壁透過性評価に応用できることを示してきた (Proc. MicroTAS 2013, 1818 (2013))。そこで、これらの研究を更に推し進めることで、現在は不明であるナノ薬剤の血管透過性を生体外で明らかにするための新たな実験系が構築できると考えた。

以上を踏まえ本研究では、ナノ薬剤の血管壁透過性を評価する無細胞マイクロ血管モデルの開発に取り組んだ。血管壁に類似した構造を有するマイクロ流路を用い、血流に相当する溶液流れ下でナノ薬剤の

透過性を評価し、ナノ薬剤の物性と透過性の関係を明らかにすることを目的とした。具体的には以下の検討に取り組んだ。

[1] 多孔膜を有するデバイスでのナノ薬剤透過試験

血管壁を模倣した多孔膜をマイクロ流路内に配し、ナノ薬剤の物性と透過性の関連評価を目的として検討を進めた。流路パターンを有する基板間に多孔膜を挟み込み、一方の流路から他方の流路へナノ粒子が移動する量・速度を実験的に検討した。

マイクロ流路パターンを有するポリジメチルシロキサン(PDMS)基板はソフトリソグラフィーにより作製した。多孔膜は市販のセルカルチャーインサートから切り出して用いた。流路パターンを有する PDMS 基板に未硬化の PDMS をスタンプし、パターンの位置合わせをしながら多孔膜を挟み込んでデバイスを作製した。従来のデバイス作製では、パターンの位置合わせが困難、多孔膜の周囲に隙間ができ溶液漏れが生じる、といった問題があった。これらを解決するために、流路パターンを単純化し膜内にすべて収まる設計とすることで、デバイスを効率よく作製できた。

作製したデバイスを用い、ナノ粒子の透過試験を行った。シリンジポンプを用い、一方の流路に蛍光標識ナノ粒子の懸濁液を 1~200 $\mu\text{L}/\text{min}$ で、もう一方の流路には粒子を含まない液を 1 $\mu\text{L}/\text{min}$ で送液した。流路の合流・分岐部を蛍光顕微鏡で観察し、各流路の蛍光強度比から粒子の透過量を算出した。多孔膜の孔内部の溶液流れがハーゲン・ポアズイユ流であり、粒子はこの流れに乗って膜を透過すること、および透過時の粒子の変形はないことを仮定し、透過量から粒子の透過速度を求めた。また、各流路への送液速度を用い、多孔膜にかかる圧力差を求めた。粒子の透過速度と圧力差の関係がダルシーの式に

従うものとして、透過係数を求めた。

孔径 1 μm の多孔膜、および粒径 0.1 μm 粒子を用いて透過試験を行ったところ、粒子の膜透過速度と圧力差の間に良好な比例関係が認められた。この結果から透過係数を求めたところ、実験値と理論値がよく一致し、本デバイスを用いたナノ薬剤の透過性評価を実証できた。一方、粒径が孔径に近づくと、実験値と理論値の乖離が認められた。本実験では流路内の多孔膜に焦点を合わせて観察しているため、粒径が異なることで観察面に垂直な方向の粒子分布が異なり、解析に影響を与えている可能性がある。

[2] 擬似血球共存系でのナノ薬剤透過試験

血球に見立てた微粒子共存下で透過試験を行い、これが透過性に与える影響を評価した。擬似血球として直径 8 μm のポリスチレン粒子を用い、これを蛍光標識ナノ粒子とともに流した。結果、擬似血球が存在することで透過係数が減少した。これは、擬似血球が存在することで膜近傍のナノ粒子の存在量が減少し、透過性を減少させたものと考えられる。

[今後の展望]

本研究はナノ薬剤の血管透過性に関する基礎的かつ精密な知見を与え、化学・工学にとどまらず生命科学や医学・生理学分野の発展にも寄与するものと考えられる。ナノ薬剤の新規評価系として本研究を確立させ、動物実験からマイクロ血管モデル実験へのパラダイムシフトを誘起していきたい。

[発表論文]

1. 土屋公彰、佐々木直樹、多孔膜集積マイクロ流体デバイスによるナノ粒子の透過性分析、日本化学会第 96 春季年会予稿集、1PB-043、京都、2016 年 3 月発表予定。

【34】 高度専門職学芸員養成プログラムの開発に関する研究

——大学博物館の効果的な活用方法の検討

東京大学総合研究博物館インターメディアテク寄付研究部門 特任助教 寺田 鮎美

〔研究の概要〕

より高い資質を有するミュージアム専門的職員の育成のためには、大学院レベルでの博物館学専門教育が必要であると考えられる。そこで、英国の博物館学修士課程をもつ五つの大学を事例に、授業内容に関し、インタビュー等の現地調査を含む情報収集を行い、共通点及び各課程の特徴について分析を行った。その結果、主な共通点として、授業内容に理論と実践の両立が図られていることがわかった。特に、大学博物館を有する大学では、大学博物館が実践的内容を扱う科目内での実習先のみならず、最長では1年を通したプレイスメント先として利用されており、理論に関わる科目でも大学博物館スタッフの人的資源の活用が見られた。このように、英国では、理論と実践の両立した博物館学専門教育に大学博物館が有効活用されていることが明らかになった。

〔研究経過および成果〕

日本では、大学における学芸員養成課程の多くは学部で開講され、資格取得者のほとんどが学部学生となっている。このことから、資格取得が必ずしも専門家養成に結びつかない点が日本の学芸員養成制度の課題として指摘されてきた。本研究では、この課題に対し、博物館学を世界的に牽引する英国の事例を参照先とし、大学院レベルでの博物館学専門教育プログラム開発について、特に大学博物館の効果的な活用方法の検討を行うことを目的とした。

調査事例には、ロンドン大学、イースト・アングリア大学、レスター大学、リーズ大学、及びマンチェスター大学を選定し、大学院レベルでの博物館学専門教育の共通点及び各課程の特徴に関する比較分析を行った。調査事例のうち、大学博物館を有する大学は、ロンドン大学、イースト・アングリア大学、マンチェスター大学の三つである。博物館学コースを設置する学科は大学別に異なり、ロンドン大学：考古学研究所、

イースト・アングリア大学：美術・メディア及びアメリカ地域研究学科、レスター大学：博物館学科、マンチェスター大学：芸術・言語及び文化学科、リーズ大学：美術・美術史及びカルチュラルスタディーズ学科となる。履修期間はどの大学もフルタイムで1年、取得単位数の合計は180単位であり、必修・選択科目のほかにプレイスメント(実習)も修了必修単位に加わる。

必修科目について見ると、ロンドン大学は、1)総括的理論、2)組織運営論、3)コレクション管理論、4)教育・情報論から構成される。これらは他大学の傾向と比較し、必修科目では最も網羅的と言える。イースト・アングリア大学も、ロンドン大学と同様の4領域を扱う。レスター大学は、2)の独立した科目がなく、一部を他の科目内で扱っている。マンチェスター大学及びリーズ大学は1)及び3)のみを独立した科目とする。4領域のうち、すべての大学で必修科目となっている2)コレクション管理に着目すると、基本知識の習得と実践が授業内容としてプログラムされており、理論と実践

の両立が図られている点を共通とする。さらに、大学博物館を有する大学の授業内容を見ると、ロンドン大学では、コレクションの取扱いやドキュメンテーション等のトピックでは大学博物館(UCL ミュージアム・アンド・コレクション)を実習先としているほか、担当教員に加え学内の各大学博物館の専門スタッフであるコレクション・マネージャー、キュレーター、コンサーバター等の人的資源の活用が見られた。イースト・アングリア大学では、授業が大学博物館(セインズベリー視覚芸術センター)内の講義室で行われており、レジストラやマーケティング・コミュニケーション担当スタッフをゲスト・スピーカーとしていた。

続いて、プレイスメントの特徴をまとめる。プレイスメントとは日本で言うところの博物館実習である。日本の学芸員養成課程の実習が一般的に1週間から10日程度であるのに対し、プレイスメントはより長期的に実施され、実際の博物館の現場に専門的に関わる点が特徴である。ロンドン大学のプレイスメント先は大英博物館やロンドン博物館等が代表例に挙げられるほか、学内のUCL ミュージアム・アンド・コレクション(例えばグラント動物学博物館、エジプト考古学ペトリ博物館、UCL 美術館)をプレイスメント先とする場合も多い。このように、大学博物館を活用する点は、ロンドン大学のみならず、大学博物館を有する大学に設置された博物館学コースの一つの特徴であると言える。最も特徴的なのは、イースト・アングリア大学である。プレイスメントは五つの大学の中で最も長い1年間を通して行われる。セインズベリー視覚芸術センターでのプレイスメントは、毎年4名が選拔され、入学と同時に1年間の有給インターンシップ(年間1万ポンド支給)に就くことができる。この制度は他の大学に見られないため、毎年競争率が高いという。このように、学

生側も博物館の現場に責任をもって関わる経験を獲得し、博物館側も学部ではなく大学院レベルで博物館学を専門とする学生を一定程度まとめた期間にわたって受け入れることには人材の確保という点でメリットがあると言える。

以上、五つの大学の事例を比較すると、博物館学コースの共通点としては、理論と実践の両立が挙げられる。これはコース全体の構成が、必修科目をはじめ大学で教授される授業とプレイスメントによるミュージアム現場での実習との組み合わせから成ることからわかる。次に、各大学のコース内容の相違点には、大学博物館がある大学ではそれを有効に活用している点が指摘できる。授業のゲスト・スピーカー等としての大学博物館スタッフの人材活用や、授業内で実習やプレイスメント先に大学博物館が利用されていた。したがって、英国の事例をわが国の状況に置き換え、大学院レベルでの博物館学専門教育プログラム開発を進めるために重要な点には、博物館学専門教育における理論と実践の両立を目指したプログラム整備とそのプログラム内での大学博物館の積極的な活用を図ることが挙げられる。

〔学会発表・報告〕

1. 寺田鮎美「英国における博物館学修士課程コース内容の比較分析—ミュージアム・マネージメント科目を中心に」、日本ミュージアム・マネージメント学会第20回大会、2015年6月7日、東京家政学院大学。
2. 寺田鮎美「英国における博物館学修士課程コース内容の比較分析—ミュージアム・マネージメント科目を中心に」『日本ミュージアム・マネージメント学会会報』第76号、2015年12月31日、3-4頁。

【35】小中学校理科教育支援のための中核的教員養成・支援に関する実証的研究

研究者 福井大学教育地域科学部 教授 浅原 雅浩

共同研究者 福井大学教育地域科学部 講師 西沢 徹

〔研究の概要〕

平成 21 年度以降、16 都府県で展開されてきた「地域の理科教育における中核的教員(コア・サイエンス・ティーチャー:以降、CST と略記)」の養成・活動及びその支援に関する取組も丸7年目を迎え、各都府県の実情に合わせた CST による地域の理科教育支援活動が展開されている。本研究では、CST の養成・活動およびその支援に関して詳細な調査を行い、その現状と課題を明らかにするとともに、各地で養成された CST が地域の理科教育力の向上に資する活動を持続的に展開していくための地域コミュニティに関して、養成・支援を進める各大学および教育委員会、更には、現在活動中の CST に対する調査を行い、その結果について考察した。

〔研究経過および成果〕

平成 21～24 年度までを開始時期として、16 都府県で展開されてきた CST の養成とその支援、および CST による各地域の理科教育支援の成果と課題について、質問紙調査と5府県でのインタビュー調査を行った。調査内容は、①CST 養成・支援及び活動の現状、②CST の活動維持・活性化するための方策、③今後の CST 養成・支援・活動の方向性、そして④ CST 活動のためのコミュニティの必要性であり、これらを報告書にまとめた。

1. 研究経過

平成 27 年5月中に CST 養成・支援活動展開中の各大学、都府県教育委員会(以下、都府県教委と略記)及び政令指定都市教育委員会(以下、政令市教委と略記)向け質問紙のひな形を作成し、これを元に関西教育大学、大阪府教委および堺市教委のインタビュー調査を行った。本調査を元に質問紙の内容を精査した後、各都府県に合わせた質問紙を作成し協力頂ける大学、都府県および政令市教委に対して実

施したところ、13 大学、12 都府県及び6 政令市より回答があった。この結果を受け、更に、信州大、三重大、三重県教委、横浜国大、横浜市教委、川崎市教委、埼玉大、埼玉県教委、さいたま市教委の計9機関のインタビュー調査を実施した。加えて、三重県、神奈川県、埼玉県および福井県の CST または養成プログラム受講中の現職小中教員計 40 名の協力を頂き、追加の質問紙調査を行った。

2. 研究成果

2-1. CST 養成・支援及び活動の現状

回答のあった 13 都府県のうち、大学生対象、大学院生対象および現職教員対象のプログラムを持つ都府県は、それぞれ 8、9、11 あり、うち 3 県は全プログラムを持っていた。また、13 都府県のうち、「現職教員と学生の交流がある」と答えた都府県は 9 つあり、主な内容としては、研修会・シンポジウム等での交流、同一研修プログラムの受講やインターンシップでの交流などであった。

CST 活動としては、①教育センター等での講師、

②勤務校内研の開催、③近隣小中学校での研修会講師、④授業公開研究会の開催が都府県の期待する CST 活動の上位であるが、③を除いて概ね期待通りの活躍であった。希望とその現状に関して、大きな地域依存性は確認できなかった。

大学及び教育委員会の行う活動支援としては、①現職 CST への研修、②CST が講師となる研修会の広報、③研修会の消耗品支援、④シンポジウムの開催等である。

2-2. CST 活動を維持・活性化するための方策

実施大学・教育委員会ともに事業の継続を望んでおり、今後の CST の活用についても多くの計画や考えがあることも分かった。一方で、CST の地域内認知度がまだまだ低いこと、事業を継続していく上での予算問題、更には、各 CST 繋がっていることがとても重要であることなどが分かった。今後、既存の各地域組織と協力しつつ、何らかの CST のためのコミュニティを各地で形成し、それを全国に繋げていくことが、一つの解決策とも考えられた。

2-3. 今後の CST 養成・支援・活動の方向性

小中学校とともに学習内容や実験観察に不安な部分を持つ教員が多いが、研修等に参加する時間確保が難しい。そこで気軽に質問できる CST が勤務校や近隣にいて、悩んだとき、困ったときに支援を受け問題解決できる環境、教員が学び続けられる環境づくりが重要である。一方、CST には意識を高め合い共に学び続けるため、一緒に活動する教員の存在が必要である。また、更に CST 活動を充実させるためには、CST の認知度を更に高めることが必要不可欠である。加えて、CST 間連携を深め、地域の中核教員として自信を持って活

動を継続できる環境づくりも重要である。実際、各 CST が必要と感じているものとして、授業力向上、教材開発や研究、一緒に活動する先生、コミュニケーション力等が挙げられている。

2-4. CST 活動のためのコミュニティの必要性

現状の形態としては、①CST 協会・連絡協議会など新たな組織、②既存組織を活用した組織、③定期的に研修会やシンポジウム、交流会を開催する形および④CST の自主的なコミュニティである。このうち、③もコミュニティではないが、コミュニティと同等の役割を果たしている。

当初の研究計画では、政令市を抱える都市部の都府県とそれ以外の県においてコミュニティのあり方や考え方に明確な違いを求めて調査を進めたが、基本的には、CST 活動を展開する上で、各都府県あるいは市区町村の既存組織の活性化状況に大いに左右されること、また、CST 活動を取り巻く大学・教委そして CST 自身の考え方によって様々な形態があることが分かった。各形態のコミュニティは様々であるが、真に地域の実情に合致したコミュニティが、各地の CST 活動を充実させる機能を持つことを再認識した。

〔発表論文〕

1. 「福井県におけるコア・サイエンス・ティーチャーを中心とした理科教育支援に関する質問紙調査とその一考察」, 月僧秀弥, 細江悦雄, 西沢 徹, 中田隆二, 三崎光昭, 福井大学教育実践研究, (2015) Vol. 40 (*in press*).
2. 「地域と連携した小学校理科の啓発支援～わくわく理科ランドの実践を通じて～」, 浅原雅浩, 本谷匠, 甲斐和浩, 西沢 徹, 月僧秀弥, 福井大学初等教育研究, 第 1 号 (*in press*).

【36】 脳内情報処理における「運動－言語連関」の理解:効果的な運動学習支援に向けて

研究者 首都大学東京人間健康科学研究科 教授 樋口 貴広

〔研究の概要〕

単語や文章の理解といった、言語処理に関わる脳内情報処理には、本来その処理とは無関連と考えられてきた、身体運動に関わる脳活動が関与しているという考え方がある（運動－言語連関）。本研究では、こうした考え方の妥当性を実験心理学的手法に基づき検証した。手の動作に関わる単語の処理が、上肢拘束により遅延するかについて、3つの実験により検討した。その結果、確かに上肢拘束により、単語に関連する判断の遅延が認められた。この遅延が、上肢拘束がもたらす運動性の問題（ボタンの押しにくさ）では説明できないことも確認した。ただし仮説と異なり、手の操作を意味する動詞だけでなく、物自体の動きを表現する動詞にも遅延が見られた。よって上肢の拘束は、モノから想起される動詞全般の処理に影響したと考えられる。

〔背景と目的〕

近年、脳内情報処理過程における運動実行系と言語処理系との間に、機能的連関関係があると指摘されている（Pulvemuller 2004, 2005）。このような関係を、運動－言語連関という。運動実行系は、適切な運動選択のために現状の身体状況を常に参照している。よって、言語が運動－言語連関として処理されているならば。その処理は現状の身体状況の影響を受けることになる。たとえば、もし身体部位の一部に拘束を与えれば、その部位に関係する言葉の処理が遅延すると予想される。

そこで本研究では、上肢を拘束することで、手の動きに関する単語への反応が遅延するかを、3つの実験に基づき検証した（図1）。もし運動－言語連関の発想が正しければ、動きに関する言葉の中でも、物の操作を意味する動詞（他動詞）のほうが、物自体の動きを意味する動詞（自動詞）よりも、上肢拘束の影響を強く受けるはずである。

〔実験課題と分析方法〕

参加者はモニターに呈示される物体と、直後に呈示される動詞が、組み合わせとして適合しているかどうかの判断課題を行った（図2）。動詞は2種類あり、手の物体操作を意味する他動詞、もしくは物体自体の動きを表す自動詞であった。上肢拘束により判断の遅延が生じるかを検討した。

回答方法として、参加者は実験1では手でボタンを押し、実験2では口頭で回答し、実験3では足でスイッチを押した。それ以外の手続きは3実験で共通であった。なお実験では、上肢拘束による反応遅延が、単にボタンの押しにくさに起因しないことを確認するため、言葉の刺激呈示後ただ

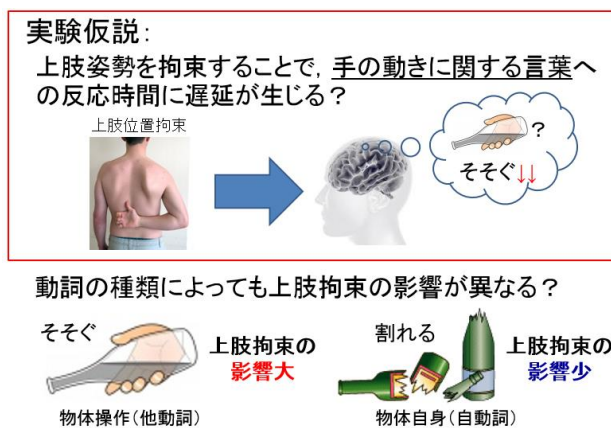


図1. 実験の仮説

ちにボタンを押す等の回答をする単純反応課題も合わせて実施した。各課題の反応時間に対して、組み合わせの適合性（適合・不適合）×動詞の種類（他動詞・自動詞）×手の位置（通常・拘束）の三要因の分散分析を行った。

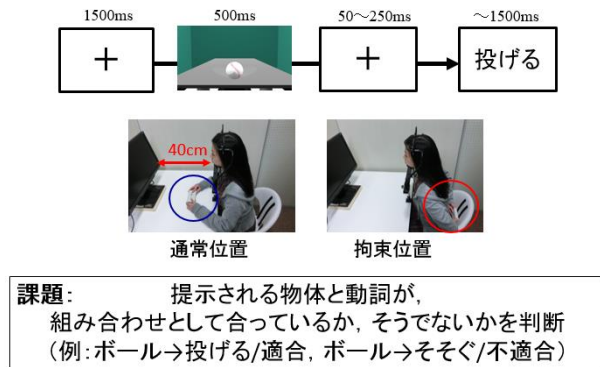


図 2. 実験課題（3 実験共通）

〔実験結果の概要〕

実験の結果、反応方法が手（実験 1）または口頭（実験 3）の場合、手の位置が通常条件のほうが、拘束条件よりも反応時間が短かった。この結果は、「上肢の拘束によって単語に関する反応が遅延する」という考え方を支持する一方で、「上肢の拘束による遅延は他動詞に対して顕著である」という考え方は支持しなかった。足で反応した場合（実験 2）には、上肢拘束の影響は見られなかった。また単純反応時間については、全ての実験において上肢拘束の影響は認められなかった。

〔結果の解釈と今後について〕

実験の結果、確かに上肢の拘束によって、単語に関連する判断が遅延することが明らかになった。単純反応時間に上肢拘束の影響が見られなかったこと、また口頭で回答しても遅延が見られたことから（実験 2）、この遅延は「拘束による運動性の問題」では説明できないことを確認した。ただし仮説とは異なり、物体自体の動きを表現しうる自動詞にも遅延が見られたこ

とから、上肢の拘束は、手の操作の関連性に関わらず、単語の処理に影響したと思われる。

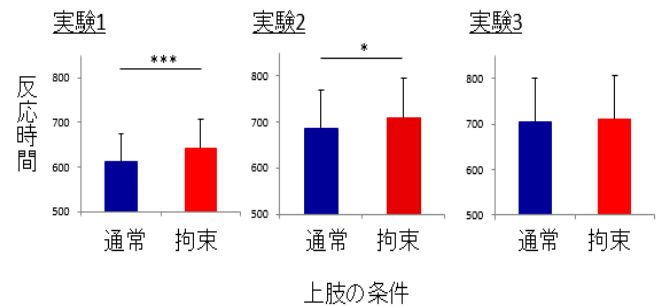


図 3 各実験における反応時間に及ぼす上肢拘束の影響

得られた成果は、運動・言語連関の考え方を一部指示するものである。この連関関係を理解すれば、言葉によって指示された運動の内容が、身体運動に変換されていくプロセスの一端を理解でき、そこから運動を効果的に導く言語指導方法が提案できると期待される。たとえば、脳卒中によって半身が麻痺している患者の運動学習をサポートする際、麻痺患者は、たとえ認知機能に何の問題がなかったとしても、運動支援者から指示された言葉を運動に変換するプロセスが、健常者とは異なると予想される。つまり、効果的な言語指導を考えるためには、常に身体状況やそれを表象する脳内システムとの相互作用を考慮する必要があることを、本研究は示唆している。

〔関連発表〕

1. 安田真章・樋口貴広 言語情報処理過程における身体スキーマの関与について。日本認知心理学会第 13 回大会，2015 年 7 月 4 日，東京大学
2. 安田真章・樋口貴広 身体状況の変化が言語処理過程の反応時間に与える影響について。

Human Movement 研究会第 7 回大会，2016 年 2 月 27 日

【37】 原発避難者支援の多様性確保に向けた仕組み構築に関する比較研究

研究者 法政大学人間環境学部 教授 西城戸 誠

〔研究の概要〕

本研究の目的は、おもに福島第一原発事故で県外避難を余儀なくされた避難者の動態とその支援のあり方について実証的に分析をすることによって、多様な被災者に対して多様なニーズの支援を行う「被災者支援多元主義」を目指す方策を探ることである。筆者らが関わっている埼玉県内への避難者支援の活動を通して、県外避難者およびその支援の実態を把握し、特に県外避難者の復興支援員（制度）に着目した調査研究を実施した。復興支援員による戸別訪問と、避難先のコミュニティ形成の中間支援が、今後の県外避難者支援の活動には不可欠であり、また復興支援員の運営上の課題について考察した。さらに、震災研究に対する実践的な調査研究のあり方を再考する試みも行った。

〔研究経過および成果〕

(1) 研究経過と成果の概要について

本研究の目的は、おもに福島第一原発事故で県外避難を余儀なくされた避難者の動態とその支援のあり方について実証的に分析をすることによって、多様な被災者に対して多様なニーズの支援を行う「被災者支援多元主義」を目指す方策を探ることである。本研究では、(1)埼玉県内に避難している避難者に対するアンケート調査、(2)支援団体や支援体制に対する聞き取り調査―復興支援員とその受託団体などへの調査―を行った。さらに震災研究の実践的な調査研究のあり方を検討した。

(2) 埼玉県における県外避難者の実態調査

筆者らは、避難者向け情報誌「福玉便り」編集部と共同で、2012年12月～2013年1月（2012年調査）、2013年12月～2014年1月（2013年調査）、2014年12月～2015年1月（2014年調査）、2015年12月～2016年1月（2015年調査）に県外避難者調査を実施した（なお、2015年調査は詳細な分析を現在、実施

している途中である）。主な知見は以下の通りである。

第一に、生活支援に関する項目については、2012年から2014年調査では、住宅の問題に対する不安や支援の要望が変わらず多く、「生活情報の提供充実」と「住宅に関すること」への回答が多かった。だが、2015年調査では、定住指向の回答者が多かったためか、住宅に関する要望が割合としては減っている。第二に、避難者の交流会やイベントについては、調査年によってばらつきはあるものの、おおむね交流を求めていることがわかる。だが、これまでの交流会に馴染んでいる避難者とそうでない避難者との間に、意識の差が生まれてしまっていることも見いだせる。第三に、家族との同居については、震災前に同居していた家族と別々に暮らしている避難者が一貫して半数近くいる。育児支援に関しては、「教育や学習塾に関する情報」などは一貫して多く、避難生活が長期化することで子どもの教育・進学が大きな問題になっていることが見いだせる。第四に、今後の生活に関しては、「埼玉県に定住したい」「地元県・埼玉県以外の都道

府県に定住したい」と回答する傾向が増えているが、帰還を希望しながらすぐには帰れない人、定住と帰還の間で揺れ動いている人など、いずれも難しい選択に立たされていることが分かる。

(3) 埼玉県における県外避難者支援体制について
埼玉県における県外避難者支援の体制に関して特筆すべき点は、復興支援員制度を用いた、浪江町、富岡町、双葉町、大熊町の県外避難者の支援の拠点が揃っている点である。このうち、浪江町と富岡町の復興支援員は、県外避難者の戸別訪問や避難先地域住民とのネットワークづくりのための交流会の開催など、町民のコミュニティ形成、避難生活支援を行っている。(2) で述べたように、避難者のニーズがより個別化、複雑化しており、そのニーズの実現や情報提供を進めるために、地域の関連組織や団体にリンクさせる体制を作っていく必要があるが、その一つの手段が復興支援員による戸別訪問であると考えられる。

だが一方で、戸別訪問を円滑に行うためには、避難元出身の復興支援員であることが望ましいが、その人材確保に苦慮している他県の復興支援員の実態がある。また、復興支援員事業の受託団体の志向性（津波被災地等におけるまちづくり活動のノウハウを重視する）により、県外避難者への戸別訪問ができない状況も散見される。

その一方で、避難先での町民のコミュニティ再構築を目的とした県外避難者主体の活動への中間支援を行う復興支援員の活動もある。定住（位置的な定住も含む）化が進む県外避難者への支援として、今後重要になってくるだろう。

上記の点から県外避難者支援の「埼玉モデル」について実践的に考えていくことが課題となる。

〔発表論文〕

1. 西城戸誠・原田峻、「埼玉県における県外避難者とその支援の現状と課題」、『人間環境論集』第15巻第1号、69-103頁、2014年12月
2. 原田峻・西城戸誠監修、「福玉便り 2015 春の号外」、2015年3月（2016年春の号外も準備中）
3. 原田峻・西城戸誠、「県外避難者支援の現状と課題——埼玉県の事例から」、関西学院大学災害復興制度研究所・東日本大震災支援全国ネットワーク(JCN)・福島の子どもたちを守る法律家ネットワーク(SAFLAN)編『原発避難白書』人文書院、209-212頁、2015年9月
4. 原田峻・西城戸誠、「原発避難をめぐる学術研究——社会科学を中心として」、関西学院大学災害復興制度研究所・東日本大震災支援全国ネットワーク(JCN)・福島の子どもたちを守る法律家ネットワーク(SAFLAN)編『原発避難白書』人文書院、227-232頁、2015年9月
5. 原田峻、「原発避難関連文献一覧」、関西学院大学災害復興制度研究所・東日本大震災支援全国ネットワーク(JCN)・福島の子どもたちを守る法律家ネットワーク(SAFLAN)編『原発避難白書』人文書院、233-239頁、2015年9月
6. 原田峻・西城戸誠、「東日本大震災・福島原発事故から5年目を迎えた県外避難の現状と課題——埼玉県における自治体・避難者調査の知見から」、『立教大学コミュニティ福祉研究所紀要』第3号、59-78頁、2015年11月
7. 西城戸誠、「実践的な調査としての震災調査に何ができるか」、『社会と調査』第16号、2016年3月(予定)

公益財団法人 カシオ科学振興財団
〒151-8543 東京都渋谷区本町一丁目6番2号
TEL (03) 5334-4747
平成28年5月1日 発行
